

Kenneth J. Hsü

Die letzten Jahre der Dinosaurier



Birkhäuser

Kenneth P. J. 1980



Die letzten Jahre der Dinosaurier

Meteoritenerschlag, Massensterben
und die Folgen für die Evolutionstheorie

Aus dem Englischen
von Joachim Rehrig

Deutscher Verlag
Frankfurt am Main

Kenneth J. Hsü

Die letzten Jahre der Dinosaurier

*Meteoriteneinschlag, Massensterben
und die Folgen für die Evolutionstheorie*

*Aus dem Englischen
von Joachim Rehork*

Birkhäuser Verlag
Basel · Boston · Berlin

Die Originalausgabe erschien 1986 unter dem Titel «The Great Dying» bei Harcourt Brace Jovanovich

© 1986 by Kenneth J. Hsü

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Hsü, Kenneth J.:

Die letzten Jahre der Dinosaurier : Meteoriteneinschlag, Massensterben und die Folgen für die Evolutionstheorie / Kenneth J. Hsü. Aus d. Engl. von Joachim Rehork. – Basel ; Boston ; Berlin : Birkhäuser, 1990

Einheitssacht.: The great dying <dt.>

ISBN 3- 7643-2364-7

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Die Vergütungsansprüche des § 54 Abs. 2 UrhG werden durch die «Verwertungsgesellschaft Wort», München, wahrgenommen.

© 1990 der deutschsprachigen Ausgabe: Birkhäuser Verlag Basel

Umschlaggestaltung: Zembach' Werkstatt, München

Printed in Germany

ISBN 3-7643-2364-7

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur deutschen Ausgabe	7
Die Frage der Überlebenstüchtigkeit	11
Gestern grenzenlose Meere – heute Maulbeerbäume	33
Keine Lücke im Schichtenprofil von Gubbio	59
C-29-R und die Magnetostratigraphie	73
Das Rätsel des Aussterbens	85
Zeugnisse aus der Tiefe	105
Der Tod vom Himmel	125
Neutronen als Detektive	145
Finsternis am hellichten Tag	163
Überlebende – zum Untergang verurteilt	181
Ein Ozean à la Dr. Strangelove	199
Saurer Regen und Stickoxyde	213
Nicht den Helden gehört der Sieg	229
Literaturhinweise	249
Glossar	252
Geologische Zeittafel	262
Index	263

Vorwort zur deutschen Ausgabe

Die Evolution ist eine historische Tatsache. Alle Evolutionstheorien gehen davon aus, daß es Beweise für den gemeinsamen Ursprung aller Arten gibt. Daß Artenvielfalt und Anpassung zur Entstehung neuer Arten führen können, ist gleichfalls ein unwidersprochener Grundsatz. Das Wesen des Darwinismus ist allerdings nicht der Glaube an die Existenz der Evolution, sondern an die Mechanismen, die Darwin für die Triebkraft des evolutionären Prozesses hielt. Besonders das Postulat von der natürlichen Zuchtwahl und der Erhaltung begünstigter Rassen im Kampf um das Leben sind für Darwin wesentlich, wie es auch der englische Originaltitel seines Werkes klar zum Ausdruck bringt.

Darwins Grundthese ist, daß die Ausrottung alter Lebensformen die unvermeidliche Folge bei der Entstehung neuer Arten ist. Die älteren sind von ihren jüngsten Verwandten ausgerottet worden. Diese Übernahme kapitalistischen Gedankenguts war einer der Gründe für die rasche Akzeptanz, die seine Lehre in der englischen und amerikanischen Gesellschaft fand. Das Konzept der Überlegenheit durch Kampf gab, so wollte es die Ironie der Geschichte, auch die pseudowissenschaftliche Grundlage für die den Kapitalismus bekämpfende marxistische Gesellschaftsphilosophie ab. Karl Marx war vom Darwinismus so angetan, daß er sein Hauptwerk, *Das Kapital*, Charles Darwin widmete. Nicht weniger schlimm ist die Tatsache, daß die Nationalsozialisten die Verbreitung von Darwins Lehren durch Ernst Haeckel für ihre Ideologie nutzten. Haeckel verherrlichte das Darwinsche Konzept der Ausrottung «Lebensuntüchtiger».

Darwins Theorie beruht im wesentlichen auf dem Aktualismus. Die Folgerungen, die er zieht, sind die kaum verhohlene Übernahme einer Lehre, die im Großbritannien des 19. Jahrhunderts allgemein verbreitet war und von Darwin auf die Befunde der jungen Wissenschaft der Paläontologie übertragen wurde. In der Welt des auf Lyell zurückgehenden Aktualismus gab es einen stabilen Grundzustand, und alle Arten mußten kämpfen, um sich ihm anzupassen. Es gab die Vorstellung von der Erhaltung begünstigter Varianten und von der Verwerfung solcher Spielarten, die man für schädlich hielt – ein Prozeß, den Darwin als «Natürliche Zuchtwahl» bezeichnete. Wer sich nicht anpassen konnte, war lebensuntüchtig und wurde allmählich eliminiert, sei es im Kampf innerhalb der Art oder im Kampf der Arten miteinander. Als glühender Anhänger Lyells konnte Darwin sich nur schwer mit dem Gedanken an eine unmittelbare Einwirkung der Umwelt auf die sich entwickelnden Arten anfreunden: Im Evolutionsprozeß konnten, so dachte er, Na-

turkatakastrophen keine Rolle gespielt haben, denn er glaubte nicht daran, daß sich je Naturkatakastrophen ereignet hatten.

Darwin legte sein Evolutionsmodell der Lebewesen im Jahre 1859 der Öffentlichkeit vor. Seine Thesen wurden während des vergangenen Jahrhunderts immer wieder von Naturwissenschaftlern überprüft. Doch tatsächlich haben die geologischen und paläontologischen Studien inzwischen weitgehend die Thesen der Darwinschen Theorie des Aussterbens durch natürliche Zuchtwahl als falsch entlarvt. Mehrmals im Lauf der Erdgeschichte kam es zu raschen Veränderungen der Umweltbedingungen, und diese Veränderungen haben auch den Gang der biologischen Evolution beeinflußt. Darüber hinaus läßt sich in einer Welt rascher Umweltveränderungen nicht definieren, was «Überlebensfähigkeit» bedeutet. Die natürlichen Anpassungsmechanismen funktionierten einfach zu langsam, so daß sich die Organismen den durch die Katastrophe bedingten neuen Gegebenheiten nicht anzupassen vermochten. So war das massenhafte Artensterben die unausweichliche Folge von Umweltkatakastrophen. In die durch das Massenaussterben leer gewordenen ökologischen Nischen drangen Überlebende ein, die sich rasch weiterentwickelten. Anpassung war also die Folge, nicht die Ursache einer Auswahl, die weitgehend vom Zufall abhängig war. Meiner Ansicht nach ist die Lektion, die wir aus der Geschichte des Lebens auf unserem Planeten zu lernen haben, nicht eine Ideologie im Sinne Darwins, sondern die taoistische Lehre des Zusammenlebens, der gemeinsamen Entwicklung sowie einer unauslotbaren Verflechtung von Zufall und Unausweichlichkeit.

Als ich 1981 mit der Niederschrift dieses Buches begann, wußte ich dies alles noch nicht. Ich hatte Darwins Evolutionslehre als eine der bedeutendsten Leistungen der zivilisierten Menschheit akzeptiert. Damals war ich ein «Fachidiot», der nur seinen eigenen Forschungen lebte. In dem erregenden Gefühl, im Zusammenhang mit dem Artensterben am Ende der Kreidezeit einen Beitrag zu einer wissenschaftlichen Entdeckung geleistet zu haben, plante ich, eine naturwissenschaftliche «Detektivgeschichte» zu schreiben. Erst als ich 1984 meinen ersten Entwurf vollendet hatte, bemerkte ich, was unsere Entdeckung für Auswirkungen auf Darwins Evolutionstheorie hatte. Ein wesentliches Thema dieser Arbeit ist in der Folgezeit die Frage geworden, ob der Darwinismus eine Wissenschaft oder eine Ideologie ist.

Die wissenschaftliche Diskussion über die Theorie der Einschläge von Boliden («Feuerkugeln») ist keineswegs völlig verstummt. Etwa 10 Jahre nach der ersten Entdeckung gab es eine Folgesitzung zu der «Snowbird-Konferenz über die geologischen Folgen von Bolideneinschlägen». Dies war im Oktober 1988, und zwar abermals in Snowbird, Utah. Die Bolidentheorie beinhaltet gewisse Hypothesen. Zahlreiche derartige Hypothesen wurden schon während der ersten Snowbird-Konferenz aufgestellt: Es habe eine totale Finsternis gegeben, dann sei es zu drastischen Klimaveränderungen gekommen, zu einem «Einschlags-Winter», gefolgt von einer Erwärmung durch den Treibhaus-Effekt. Außerdem müsse der Ozean nahezu ohne Lebewesen gewesen sein. All diese Hypothesen waren inzwischen weitgehend

bestätigt worden. Auch für die Richtigkeit der Hypothese weltweiter Brände, die im Kapitel 9 dieses Buches abgehandelt wird, gibt es inzwischen Indizien. Danach haben riesige Brände am Ende der Kreidezeit zu einer weitgehenden Zerstörung der damals vorhandenen Wälder geführt. Edward Anders und seine Mitarbeiter von der Universität Chicago haben in den endkreidezeitlichen Sedimenten Holzkohlenruß gefunden, der von einer solchen Brandkatastrophe zeugt.

Andere Hypothesen gingen davon aus, der Sturz eines Meteoriten in den Ozean habe wie ein größeres Seebeben riesige Sturzwellen hervorgerufen. Wir diskutierten diese Frage in einiger Ausführlichkeit während der ersten Snowbird-Konferenz, weil bis dahin noch keine entsprechende Ablagerung gefunden worden war. Wieder andere waren der Ansicht, der einschlagende Bolide sei an Land aufgeprallt. Und dritte wollten gern wissen, ob die Ablagerungen von Sturzwellen überhaupt im geologischen Schichtenbefund erkennbar seien. Deshalb herrschte besondere Zufriedenheit, als eine Wissenschaftlerin der Universität von Washington, Joan Bourgeois, auf der zweiten Snowbird-Konferenz berichten konnte, sie habe in dem Brazos-Gebiet von Texas Sturzwellen-Sedimente aus dem frühesten Tertiär entdeckt, die unmittelbar über Sedimenten der Endkreidezeit lagen.

Man fragte dann sogar weiter, wo der Einschlagkrater des Meteoriten gelegen haben könne. Russische Teilnehmer schlugen Einschlagstätten in Sibirien vor, amerikanische Kollegen dagegen dachten eher an den Manson-Krater in Iowa. Chris Hartnady von der Universität Kapstadt vermutete einen Krater unter dem Amirantebecken im Indischen Ozean. Dieser ist nach Alter und Struktur vielleicht der richtige – er mißt etwa 250 Kilometer im Durchmesser und ist damit auch groß genug.

Nicht alle Wissenschaftler haben die Bolidentheorie des Massenaussterbens akzeptiert. Allerdings besteht Konsens darin, daß ein Massensterben der Arten nicht nur einmal, sondern mehrere Male in der Geschichte des Lebens auf unserem Planeten stattgefunden hat – jedesmal verursacht durch eine Naturkatastrophe. Die wissenschaftlichen Debatten über die Auslösemechanismen dieser Naturkatastrophen können sich also noch jahrzehntelang fortsetzen. Doch wir alle stimmen darin überein: Die Opfer der Katastrophen wurden nicht, wie einst Darwin glaubte, von ihren nächsten Verwandten ausgerottet.

Der Zweck dieses Buches ist daher zweigeteilt: Es soll einerseits die Geschichte einer wissenschaftlichen Entdeckung dokumentieren und andererseits hervorheben, daß Darwins Theorie der natürlichen Zuchtwahl einer wissenschaftlichen Grundlage entbehrt.

Mit dem Aufstieg des Nationalismus im ausgehenden 19. und im 20. Jahrhundert wurde auch die Lehre von der Unvermeidbarkeit des Existenzkampfes mit den bekannten Folgen in aller Welt verbreitet. Nationale Verteidigungstruppen werden noch heute aufgestellt, um eine Invasion durch unsere nächsten Verwandten zu verhindern. Wie einige Vorkämpfer einer «Schweiz ohne Armee» hervorgehoben haben, sind unsere Nachbarn nicht

unsere künftigen Feinde. Wir brauchen uns nicht darum zu sorgen, wie wir uns gegen sie verteidigen. Unser wahrer Feind sind Katastrophen unserer Erde.

Die Mutter Erde funktioniert wie ein lebender Organismus, und die verschiedenen Arten von Lebewesen sind die Zellen dieses lebenden Individuums. Die Mutter Erde ist krank, sie hat Krebs. Die Bevölkerung der Welt wächst kontinuierlich weiter, wie ein bösartiges Krebsgeschwür. Wir sind im Begriff, die Welt, in der wir leben, ebenso zu zerstören, wie es vor 65 Millionen Jahren der endkreidezeitliche Meteorit tat. Keine der «begünstigten Rassen» wird dann um den Preis der Ausrottung «Lebensuntüchtiger» überleben, wie Darwin uns glauben machen möchte. Die Art *Homo sapiens* wird ausgerottet werden, wenn Gaia an Krebs stirbt.

Die Frage der Überlebenstüchtigkeit

Meine Jugend war von vielerlei Ungereimtheiten und Widersprüchen überschattet. In den Jahren des Chinesisch-Japanischen Krieges, der erst 1945 endete, als Japan von den Alliierten, insbesondere den USA, geschlagen worden war, lebte ich in Tschungking, der damaligen provisorischen Hauptstadt Chinas. Zu Hause hielt meine Mutter die konfuzianischen Tugenden der Mäßigung und des Verzeihens hoch und lehrte mich den taoistischen Grundsatz, das Leben in Liebe und Ergebenheit hinzunehmen. In der Schule dagegen wollte man mit aller Macht radikale Patrioten aus uns machen. Jeden Morgen mußten wir zunächst antreten und eine halbe Stunde lang gymnastische Übungen absolvieren, die der Körperertüchtigung dienten. In der verbleibenden halben Stunde vor dem Frühstück hielt unser Rektor bombastische Reden. Wir hätten unseren Willen zu stählen, um den Kampf um unser Überleben zu bestehen, verkündete er uns. Wer schwach sei, werde untergehen. Nur die Starken würden überleben. Stark müßten wir sein, und unsere Stärke galt es nicht durch schicksalsergebene Hinnahme des Lebens zu erwerben, wie meine Mutter sie uns vorlebte, sondern durch Haß.

Zur gleichen Zeit lauschte auf der anderen Seite der Front ein zehnjähriger deutscher Junge den Haßtiraden eines Joseph Goebbels und trat der Hitlerjugend bei. Den Theorien unserer Lehrer zufolge hätte einer von uns beiden den anderen niederringen müssen. Doch meine Mutter hätte es kaum überrascht, wenn sie erfahren hätte, daß wir heute Kollegen, Nachbarn, ja Freunde sind.

Wir beide überlebten den Krieg. Allerdings waren wir einer grausamen Ideologie aufgesessen, der zufolge der Konkurrenzkampf zwischen Individuen, Klassen, Völkern oder Rassen die Grundbedingung alles Lebens ist, und auch die Ausbeutung der Unterlegenen durch die Überlegenen im Einklang mit der Natur steht. Während des letzten Jahrhunderts und darüber hinaus hielt man diese Ideologie für ein wissenschaftlich erhärtetes Naturgesetz, für den Mechanismus der Evolution, deren Theorie Charles Darwin (1809–1882) in seinem 1859 erschienenen Hauptwerk *On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (deutsch 1893 unter dem Titel: *Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl*) mit so großer Überzeugungskraft begründet hat.

Vier Jahrzehnte sind vergangen, seit ich auf den Schulhof hinausmarschierte, um mir dort anzuhören, wie unser Rektor mit seinem darwinistischen Überlegenheitsanspruch mir die Weisheiten auszutreiben suchte, die meine Familie mir zu Hause vermittelte. Und in Anbetracht dessen, was der

Zweite Weltkrieg brachte, was sich seither ereignete, ja was sich als entsetzliche Katastrophe für die gesamte Menschheit in Zukunft noch ereignen kann, muß ich mich fragen, welche Art von Überlebensfähigkeit durch den Ausgang solcher Kämpfe unter Beweis gestellt wird. Und da ich Naturwissenschaftler bin, sehe ich meine Aufgabe ganz besonders darin, die wissenschaftliche Stichhaltigkeit eines Begriffs zu hinterfragen, der dermaßen viel Schaden anrichten kann.

Der Schiffsarzt Darwin war Geologe und Naturforscher. Ihn interessierte die Geschichte des Lebens. Doch wenn man sich intensiv mit der Geschichte des Lebens auf unserem Planeten befaßt, stößt man schnell auf etwas sehr Paradoxes: Zwar kennt die Wissenschaft Millionen von Lebensformen, doch praktisch alle, die es je gab, sind ausgestorben. Zwar hat die Gesamtzahl aller gleichzeitig lebenden Arten während der letzten halben Million Jahre nicht wesentlich zugenommen, doch die durchschnittliche Lebensspanne einer einzelnen Art ist im Verhältnis zur Geschichte des Lebens insgesamt ebenso kurz wie ein einzelnes Menschenleben im Vergleich zur Geschichte der Menschheit. Tatsächlich repräsentieren die heute lebenden Arten nur einen Bruchteil von 1% sämtlicher Arten von Organismen, die es je gab.

Betrachtet man die Dinge unter diesem Blickwinkel, muß die Evolutionstheorie nicht nur die Entstehung, nicht nur das Werden, sondern auch das Vergehen der Arten erklären. Für Darwin war derselbe Mechanismus, der die Arten hervorbrachte, auch für deren Aussterben verantwortlich. Jeder einzelne Organismus unterscheidet sich bis zu einem gewissen Grad von allen anderen, und seine einzigartigen Merkmale sind unübertragbar. Inmitten dieser unendlichen Vielfalt von Individuen entfaltet die Natur ihre Schöpferkraft. Diejenigen, die sich für eine bestimmte Lebensweise am besten eignen, haben gute Chancen zu überleben, sich fortzupflanzen und ihre überlegenen Eigenschaften an ihre Nachkommen weiterzugeben. Die weniger Lebenstüchtigen gehen unter; infolgedessen verschwinden die Eigenschaften, die sie unterlegen machen, aus der Erbmasse der Gesamtpopulation. Wird eine solche Population, die sich beständig verändert, so vom Hauptstrang ihrer Art isoliert, daß es zu keiner Mischung mehr kommt, weicht sie schließlich so sehr ab, daß sich eine neue Art ergibt. Trifft diese dann auf ihre nächsten Artverwandten, wird die eine oder andere Variante das Übergewicht bekommen und ihre Konkurrenz-Variante ausrotten. Darwin erklärt diese Konsequenz des Naturgesetzes vom Überleben des Tüchtigsten wie folgt:

Meiner Ansicht nach folgt daraus unvermeidlich, daß, da neue Arten im Laufe der Zeit durch natürliche Zuchtwahl entstehen, andere seltener werden und schließlich aussterben. Es sind die am engsten miteinander verwandten Formen, Varietäten derselben Art und Arten derselben Gattung oder verwandter Gattungen, die, weil sie nahezu die gleiche Struktur, Konstitution und Lebensgewohnheiten haben, in der Regel miteinander in stärkste Konkurrenzkämpfe

geraten. Infolgedessen wird jede neue Art während des Prozesses ihrer Formation in der Regel den stärksten Druck auf ihre nächsten Verwandten ausüben und dazu neigen, sie auszurotten.

Wir sind mit Dinosauriern und anderen höchst seltsamen Wesen aus vergangener Zeit vertraut. Deshalb verblüfft es uns, daß Darwins Zeit vom Aussterben fossiler Tierarten noch nichts wußte. Zwar kannte man schon seit dem Altertum Fossilien, insbesondere fossile Muscheln, doch viele hielten es für möglich, daß sie, obwohl klar von rezenten (neuzeitlichen) Muscheln unterschieden, nur eine frühere Form in einer kontinuierlichen Übergangskette von einer Art zur anderen darstellten. So gesehen, wäre es ebenso unkorrekt gewesen, das Verschwinden einer früheren Form als Aussterben zu bezeichnen, wie es falsch wäre, vom «Aussterben» eines Kindes zu sprechen, nur weil es erwachsen geworden ist. Das erste fossile Skelett eines Sauriers wurde 1770 entdeckt – vierzig Jahre, bevor Darwin geboren wurde. Dieses Skelett jedenfalls entsprach erstmals mit absoluter Sicherheit dem Knochenbau keiner bekannten lebenden Kreatur.

Man barg den fossilen, 1,30 Meter langen Kiefer mit seinen dolchartigen Zähnen aus einer Kreideschicht in einem Steinbruch am Petersberg bei Maas-tricht, Holland. Die Finder zitierten zwei Anatomen, Vater und Sohn, herbei, um den Fund zu identifizieren. Beeindruckt von der Größe des Fundstückes sowie angesichts der Tatsache, daß es in eine Ablagerung von Seemuscheln eingebettet war, erklärte der Vater es für den Überrest eines urzeitlichen Wals. Der Sohn dagegen muß ein schärferer Beobachter oder ein besserer Anatom gewesen sein. Jedenfalls dachte er anders. Und er erkannte: Der Kiefer sah wie der einer Eidechse aus. Wer aber hatte je eine so gigantische Eidechse gesehen – eine Echse zudem, die im Meer schwamm? Besonders nahe lag daher die Erklärung, das monströse Untier habe vor der biblischen Sintflut gelebt und sei ihr vielleicht zum Opfer gefallen.

Ein Geistlicher, dem das Grundstück mit dem Steinbruch gehörte, berief sich auf seine Rechte als Besitzer, um den Fund an sich zu bringen. Und prompt brachte man das Stück im zugehörigen Herrenhaus in einer Vitrine unter.

Die Kunde von der Entdeckung eines «vorsintflutlichen Drachens» verbreitete sich rasch und erreichte bald auch Georges Cuvier (1769–1832), den führenden Anatomen seiner Zeit. Napoleon Bonaparte (1769–1821), der Cuviers Expeditionen zum Sammeln von Fossilien unterstützte, gab dem Befehlshaber seiner Armee zur «Befreiung» Hollands 1795 Order, das kostbare Fundstück unversehrt mitzubringen. Die siegreiche Armee marschierte in Maastricht ein, besetzte das Schloßchen, fand die Vitrine aber leer. Der Skelettüberrest war gestohlen worden.

Der General bot 600 Flaschen besten Wein für den abhanden gekommenen Drachenkiefer, und schon bald konnten sich plündernde Soldaten die Belohnung einstecken. Man brachte die ersehnte Beute zu Schiff nach Paris und zu Cuvier.

Cuvier war damals erst 26 Jahre alt. Gerade erst hatte er eine Untersuchung von Mastodon-Knochen abgeschlossen, die ihn davon überzeugt hatte, daß es sich bei dem fraglichen Urzeit-Elefanten keineswegs um eine Frühform heutiger Elefanten handelte, sondern um eine ausgestorbene Art ohne irgendwelche Nachkommen. Nun begann er seine Zeitgenossen zu bearbeiten, um sie zu überzeugen, daß es tatsächlich solche ausgestorbenen Tierarten gegeben habe. Das riesige Lebewesen, dessen Rest man bei Maastricht gefunden hatte, war der Beweis, den er brauchte. Obwohl er bemerkenswerte Ähnlichkeit mit den landbewohnenden Panzerechsen der Tropen aufwies, hatte der zweimal so große *Mosasaurus*, die «Maas-Echse», wie man das Reptil schließlich nannte, einst im Meer gelebt.

Im Jahre 1822 – Darwin war damals gerade 13 Jahre alt – folgte dieser sensationellen Entdeckung der erste Fund von Dinosaurier-Überresten. Es handelte sich lediglich um Fragmente – ein Stück Schenkelknochen, ein paar riesige Zähne –, die von der Frau des in Südengland lebenden Fossilien-sammlers Gideon Mantell ausgegraben wurden.

Mantell hielt die Überreste für die eines Reptils. Doch die Reptilien, die man damals kannte, waren Fleischfresser mit den dafür typischen spitzen Zähnen. Die Kauflächen der Zähne aber, die Mrs. Mantell gefunden hatte, waren flach abgeschliffen – ein typisches Zeichen dafür, daß diese Gebißfragmente von einem Pflanzenfresser stammten.

Abermals fragte man Cuvier, den Experten, nach seiner Meinung. Er bestätigte es: Die Zähne stammten zwar von einem Reptil, aber dieses Reptil war ein Pflanzenfresser! Schließlich stieß Gideon Mantell im Hunter-Museum des Royal College of Surgeons zu London auf das Skelett eines Iguans bzw. Leguans, dessen Gebiß, abgesehen von dem gewaltigen Größenunterschied, auffallend an die Dinosaurierzähne erinnerte. Daher bezeichnete er seinen Fund als *Iguanodon* («Leguanzahn»), und 1825 wurde die Entdeckung zusammen mit dem entsprechenden Namen des Urzeitwesens der Öffentlichkeit bekanntgegeben.

Von der Zahngröße lebender Leguane ausgehend, kam ein Oxford-Professor namens Sir Richard Owen (1804–1892) zu dem verblüffenden Ergebnis, das *Iguanodon* müsse zwischen 30 und 60 Metern lang gewesen sein – mit anderen Worten: halb so lang wie ein Fußballplatz. Weitere Ausgrabungen, die Mantell und andere Amateure nun mit Fiebereifer unternahmen, förderten im Lauf der nächsten 14 Jahre Rippen, Wirbel und andere Knochenüberreste zutage. Ihre Größe zwang Sir Richard, seine anfängliche, übertriebene Schätzung auf etwa 7 Meter zu reduzieren. Die fossilen Knochen bewiesen: Diese Urzeit-Echsen waren von viel massiverem, robusterem Körperbau als heutige Eidechsen und hatten viel gewaltigere Körpermaße. Außerdem stellte sich heraus: Der Brustkorb eines *Iguanodon* war im Prinzip von gleicher Struktur wie der heutiger Krokodile, deren Vierkammer-Herz sehr viel weiter entwickelt ist, als die Dreikammer-Hezen anderer Reptilien. Sir Richard Owen vermutete, das *Iguanodon* müsse ein Herz- und Kreislaufsystem besessen haben, das dem warmblütiger Wirbeltiere nahekam. Owen war es, der

diesen Tieren den Sammelnamen Dinosaurier («Schreckensechsen») gab. Königin Viktoria (Regierungszeit: 1837–1901) beauftragte einen Bildhauer, der sich auf Tierdarstellungen spezialisiert hatte, für die Weltausstellung von 1851 eine auf Owens Beschreibung fußende Rekonstruktion einer solchen «Schreckensechse» anzufertigen. So erhielt das *Iguanodon* die Gestalt eines riesigen, schwerfälligen Vierfüßlers, der seinen Besuchern wild entgegenstarrte – unter anderem auf die Queen selbst und deren Prinzgemahl.

Unterdessen hatte Ferdinand Hayden, der nachmalige Leiter des Geologischen Forschungsdienstes der Vereinigten Staaten, am Judith River in Montana, also mitten im «Wilden Westen», weitere Dinosaurierzähne entdeckt. Er vermachte seine Sammlung der Naturwissenschaftlichen Akademie in Philadelphia, deren Direktor Joseph Leidy sie untersuchte. Diese Zähne stammten von anderen Dinosaurierarten – einem Pflanzenfresser, dem Leidy den Namen *Trachodon* («Rauhzahn») gab, und einem Fleischfresser, den er *Deinodon* («Schreckenzahn») nannte.

Doch diese Zähne gaben nur einen kleinen Vorgeschmack. Bald schon sah sich Leidy imstande, ein nahezu vollständiges Skelett vorzuweisen, das bei Haddonfield in New Jersey freigelegt worden war. Er bezeichnete es als *Hadrosaurus*. Zähne, Unterkiefer und Rückenwirbel, desgleichen «Oberarmknochen» sowie Speiche und Elle von Vorder- und Hinterlauf stammten von einem einzigen Tier. Ein Vergleich der Zähne des *Hadrosaurus* mit denen des *Iguanodon* legte die Vermutung nahe, daß die beiden Dinosaurier-Exemplare eng miteinander verwandt gewesen sein müssen, doch das Skelett von Haddonfield wies wenig Ähnlichkeit mit dem aufgrund der Interpretation Owens rekonstruierten Saurierskelett auf. Seine Vorder- und Hinterläufe waren von vollkommen unterschiedlicher Größe. Hadrosaurier und *Iguanodonten* waren überhaupt keine Vierfüßler. Zwar besaßen sie vier Gliedmaßen, bewegten sich aber offensichtlich nicht auf allen vieren fort. Leidy vermutete, daß sie vielmehr auf ihren Hinterbeinen gestanden haben und wie Kängurus gehüpft sein müssen.

Während der sich anschließenden Jahrzehnte förderten konkurrierende Teams (die oft von Industriemagnaten finanziert wurden und sich nur manchmal auf das Ausgraben alter Knochen verlegt hatten, um die Sammlerwut ihrer Auftraggeber zu befriedigen) eine verwirrende Palette von Urzeit-Ungeheuern zutage. Man sammelte ihre Ausbeute, schenkte sie Monarchen und Staatspräsidenten und stellte sie in königlichen oder staatlichen Museen zur Schau, wo sich das gaffende Publikum an ihnen ergötzte.

Einige waren geradezu Supergiganten. Von *Brontosaurus* und *Brachiosaurus*, die mit etwa 55 Tonnen auf das Lebendgewicht von fünf heutigen Elefanten gekommen sein müssen, nahm man an, sie seien viel zu schwer gewesen, um ihre Körpermassen an Land zu schleppen. So bildete man sie ab, wie sie im Schlamm herumpaddelten, ihre langen Hälse elegant gekrümmt, um Wasserpflanzen abzuweiden, oder bis zu den Nüstern mit dem Kopf im Wasser liegend. Was die Fleischfresser angeht, so erreichte der Riesenwuchs seinen absoluten Höhepunkt mit dem *Tyrannosaurus rex*, dem

gewaltigsten Raubtier, das je existierte. Seine Zähne besaßen die Größenordnung von Eispickeln. Als man sein Skelett in aufrechter Position mit seinem mächtigen, am Boden schleifenden Schwanz restaurierte, mußten Betrachter zu ihrer größten Verblüffung entdecken, daß ein Mensch von durchschnittlicher Körpergröße nur bis zu den Knien des Ungeheuers reichte!

Andere Dinosaurier wiesen exotische Körper-«Zierformen» und «natürliche Waffen» auf: Die riesigen Knochen-Halskrausen der Saurier des *Keratops*-Typs, unterschiedliche Knochenplatten auf dem Rücken, die Schwanzstacheln und -stäbe der Stegosaurier, die bizarr geformten Schädeldächer des *Hadrosaurus* sowie die messerscharfen Daumenspitzen, die vielleicht das *Iguanodon* besaß und die vermutlich dazu dienten, die Augen seiner ansonsten unverwundbaren Freßfeinde auszukratzen.

Als die Suche nach Fossilien weiterging, tauchten kleinere Kreaturen mit klauenbesetzten Flügeln und langen Federn auf, die an mythische Greifen erinnerten. Man hielt sie für urtümliche Vögel und nannte sie daher *Archaeopteryx* (was nichts anderes als «Urvogel» bedeutet). Außerdem kamen aus der Tiefe uralter Sedimentschichten Reptilien – keine Dinosaurier – zum Vorschein, die so märchenhaft aussahen wie nur je irgendein Fabelwesen. Beispielsweise war *Elasmosaurus* ein Seedrache, dessen Aussehen die Sage vom Ungeheuer in Loch Ness inspiriert haben könnte. Pterosaurier waren geflügelte Reptilien – manche nur so groß wie Krähen oder noch kleiner, manche an die Größe von Adlern heranreichend. Eines dieser Geschöpfe, das am Meer lebende *Pteranodon* mit seiner Flügelspanne von 15 Metern, war vermutlich das größte Lebewesen, das je die Luft bevölkerte. Allem Anschein nach nicht stark genug, um mit den Flügeln zu schlagen, hielt man die Pterosaurier für Gleitflieger, die nur starten konnten, indem sie sich von Baumwipfeln oder Klippen fallen ließen.

Nach Darwin starb diese erstaunliche Tierwelt, die vor mehr als 65 Millionen Jahren lebte, weil sie den Wettkampf ums Überleben verloren hatte. Darwin verglich den Schauplatz dieses Kampfes mit «einem ertragreichen Tagebau mit zehntausend scharfen Keilen dicht nebeneinander, die mit unaufhörlichen Schlägen eingetrieben werden – bisweilen ist der eine oder andere ein wenig stärker.» In diesem Vergleich entspricht jeder Keil einer Varietät oder einer Art, die Schläge sind die Triebkräfte der natürlichen Zuchtwahl. Da jeder Keil einen bestimmten Raum einnimmt, wenn er eingeschlagen wird, wird man durch das Einschlagen andere, die vorher diesen Raum innehatten, aus dem Wege drängen. Ebenso verfährt eine überlebens-tüchtige Art mit einer weniger lebens-tüchtigen. Darwin verdankte seine Idee von der raumbedingten Begrenztheit der Artenzahl Malthus' (1766–1834) ganz ähnlicher Idee von der räumlichen Begrenztheit des Bevölkerungswachstums. In seiner Autobiographie schrieb er:

Im Oktober 1838, das heißt also fünfzehn Monate, nachdem ich meine systematische Forschung begonnen hatte, las ich ganz zufällig zu meinem Vergnügen Malthus' Schrift über die Bevölkerung [An Essay on the Principle of

Population», anonym, 1798; deutsch: «Eine Abhandlung über das Bevölkerungsgesetz», 1807], und durch lange, kontinuierliche Beobachtungen der Lebensweisen von Tieren und Pflanzen gut darauf vorbereitet, den Existenzkampf wahrzunehmen, der überall im Gange war, merkte ich sofort, daß unter solchen Umständen aussichtsreiche Varianten dahin tendieren würden zu überleben, weniger aussichtsreiche dagegen, unterzugehen. Das Ergebnis wäre die Entstehung neuer Arten. Hier hatte ich endlich eine Theorie, mit der ich arbeiten konnte.

Darwin veröffentlichte diese Überlegungen erst zwanzig Jahre später und wurde vor allem deshalb zum Handeln angespornt, weil ein junger Forscherkollege, der Zoologe Alfred Russell Wallace (1823–1913), mit der gleichen Idee an die Öffentlichkeit getreten war. Man glaubt es fast nicht: Zwei Jahrzehnte, nachdem Darwin «zum Vergnügen» Malthus gelesen hatte, kam Wallace auf der entgegengesetzten Seite der Erde, auf Neuguinea, durch genau die gleiche Lektüre auf die gleiche Idee:

Ich befand mich damals [im Februar 1858] in Ternate auf den Molukken und litt an einer ziemlich schweren Attacke von Wechselfieber, das mich täglich mehrere Stunden mit Kälte- und Hitzewallungen niederwarf. Als ich während eines dieser Anfälle erneut über den Ursprung der Arten nachdachte, erinnerte ich mich dunkel an Malthus' Essay on [the Principle of] Population (den ich zehn Jahre zuvor gelesen hatte) und die «positiven Wachstumshemmer» wie Krieg, Krankheiten, Hungersnöte, Unfälle usw., die er als Grund dafür anführte, daß alle wilden Völkerschaften nahezu gleichstark bleiben. Dann fiel mir ein, daß diese Populations-Wachstumshemmer ja auch auf Tiere einwirken und ihre Anzahl niedrig halten müssen. Während ich noch unklar darüber nachdachte, blitzte in mir förmlich der Gedanke an ein Überleben der Lebenstüchtigsten auf – daß die von derartigen Populations-Wachstumshemmern aus dem Wege geräumten Individuen alles in allem denen unterlegen sein müßten, die überlebten. Dann dachte ich an die Variationen, die beständig in jeder neuen Tier- und Pflanzengeneration auftreten, an die ständigen Änderungen des Klimas, der Ernährungsweise und der Fressfeinde, mir wurde die ganze Methode klar, nach der sich die Arten verändern, und in den zwei Stunden meines Fieberanfalls hatte ich meine Theorie in ihren Hauptpunkten durchdacht.

Thomas Robert Malthus (1766–1834) hatte seinen *Essay on the Principles of Population* erstmals 1798 veröffentlicht – mitten in den unruhigen Jahren der industriellen Revolution –, und in manchen soziologischen Seminaren ist diese Schrift noch immer Pflichtlektüre. Was Malthus lehrt, verdeutlichen die jüngsten Erfahrungen in China. Während eines Jahrhunderts voller Kriege und Bürgerkriege, das 1949 endete, war die chinesische Bevölkerung konstant stabil. Doch in den darauffolgenden drei Jahrzehnten verdoppelte sie sich von 500 Millionen auf eine Milliarde Menschen. Bei dieser Wachstumsrate gäbe es

im Jahre 2110 zwei Milliarden, 2140 vier Milliarden und schon 2410 gar eintausend Milliarden Chinesen, vorausgesetzt, daß so viele Menschen überhaupt auf dem Erdball Platz haben. Doch derart erschreckende Zukunftsperspektiven können nach Malthus nie Wirklichkeit werden, weil der Kampf, den die Völker ums tägliche Überleben austragen, ein Wachstumshemmer ist, der einer uferlosen Vermehrung der Bevölkerung Schranken setzt.

Der Aufschrei der Empörung, den Darwins Werk über die Entstehung der Arten auslöste, hatte überhaupt nichts damit zu tun, daß Darwin von einem allgemeinen Lebenskampf und vom Überleben der Tüchtigsten gesprochen hatte. Was dagegen so manchen tief betroffen machte, war die Theorie der gemeinsamen Abstammung – daß sämtliche Organismen an irgendeiner Gabelung ihres Stammbaums einen gemeinsamen Vorfahren mit einem oder mehreren verwandten Organismen aufweisen, und daß der gesamte Stammbaum aller Lebewesen, wenn man ihn in allen Details aufzeichnete, in einer einzigen Lebensform wurzelte, von der alle anderen abstammten. Und nach welchen Mechanismen sich Lebensformen verzweigten, um neue Arten zu bilden, schien den hartgesottenen Protagonisten der Industrierevolution klar zu sein.

Daß der Tauglichste, Tüchtigste überlebt, wurde sofort als Naturgesetz akzeptiert – ein Naturgesetz wie geschaffen für den Kapitalismus und seinen rücksichtslosen Konkurrenzkampf. Der Großindustrielle Andrew Carnegie (1835–1919) schrieb:

Es gibt nun einmal das Gesetz des Wettbewerbs, sei es nun menschenfreundlich oder nicht. Wir können ihm nicht entgehen. Einen Ersatz dafür fand man nicht. Und wenn dieses Gesetz manchmal vielleicht auch hart für das Individuum ist, für die Rasse ist es das beste, denn es sichert das Überleben des Tüchtigsten in jedem Bereich.

John Davidson Rockefeller (1839–1937) behauptete mit großem Pathos: «Das Wachstum eines großen Geschäftes ist nur das Überleben des Tüchtigsten. Es ist die Verwirklichung eines Naturgesetzes, das ein Gesetz Gottes ist.» Doch die Begeisterung für das neuentdeckte Wirken der Natur beschränkte sich keineswegs auf Kapitalisten. Vielmehr wandte der italienische Sozialist Enrico Ferri (1856–1929) eben dieses Gesetz gegen den Kapitalismus an. Sein Argument: Unter den unnatürlichen Bedingungen des Klassensystems könne man nicht verlangen, daß das System der natürlichen Zuchtwahl funktioniere. Die Tüchtigen bekämen erst dann die Übermacht, wenn die Ungerechtigkeiten der Verteilung von Reichtum und Privilegien im Kapitalismus beseitigt seien. Karl Marx (1818–1883) veränderte diesen Gedanken abermals. Im Jahre 1861 schrieb er:

Darwins Buch ist sehr bedeutend, und es trifft sich für mich gut, daß es den Gedanken des Klassenkampfes in der Geschichte vom Gesichtspunkt der Naturwissenschaft her stützt.

Begreiflicherweise verehrte Friedrich Engels (1820–1895) beide Lehrmeister: Darwin, weil er die in der Biologie waltenden Gesetze entdeckt hatte, Marx, weil er deren Mechanismen in der Menschheitsgeschichte fand. Und er brachte seine eigene Deutung ein: Das Proletariat ist dafür bestimmt, den Kampf ums Dasein zu gewinnen, denn im Vergleich zur Bourgeoisie sind seine Angehörigen die «bessere Zuchtrasse».

Während Politiker die natürliche Zuchtwahl deuteten, wie es ihrer jeweiligen Rechts- oder Linkslastigkeit entsprach, vergeudeten die Rassisten keinen Augenblick, auch ihre Ansichten mit Darwins Gesetz zu rechtfertigen. Zu verlockend war der Untertitel von Darwins Buch: *The Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (Die Erhaltung begünstigter Rassen im Kampf um das Leben). Hatte doch Darwin sogar erklärt, daß sich Rassen voneinander auf dieselbe Weise unterscheiden «wie eng miteinander verbundene Arten»! Noch waren kaum zwei Jahrzehnte vergangen, seit Darwin sein Werk veröffentlicht hatte, und schon brachte es Alfred Marshall (1842–1924), ein britischer Nationalökonom, ganz unverblümt mit rassistischem Gedankengut in Verbindung, womit er seinen Zeitgenossen nach dem Munde redete.

Es kann kein Zweifel bestehen, daß [die] Ausbreitung der englischen Rasse ein Segen für die Welt war. [Doch] wenn die unteren Klassen der englischen Bevölkerung sich rascher vermehren als die moralisch und körperlich höher stehenden, wird nicht nur die Bevölkerung Englands an Substanz verlieren, sondern auch die Teile der Bevölkerung Amerikas und Australiens, die von Engländern abstammen, werden weniger intelligent sein. Wenn sich aber die Engländer wiederum langsamer vermehren als die Chinesen, wird diese lust- und schwunglose Rasse Teile der Erde überrennen, die sonst von englischer Tatkraft bevölkert worden wären.

Vom Rassismus war es nur ein Schritt zur Eugenik («Rassenhygiene», «Erbgesundheitslehre»), einer von Francis Galton (1822–1911) begründeten Schule, die auf dem Boden des Darwinismus das Ziel verfolgte, durch Anwendung der «Vererbungslehre, von Veränderungen und des Prinzips der natürlichen Zuchtwahl» die Lebenstüchtigkeit der menschlichen Rasse zu verbessern. Und von der Eugenik war es kein großer Sprung mehr bis zum Völkermord.

Die von den Nazis angeführte «wissenschaftliche» Rechtfertigung des Völkermordes läßt sich bis zu Ernst Haeckel (1834–1919) zurückverfolgen, einem Biologen und Naturphilosophen, der Darwins Ideen in Deutschland einführte, und sich ihrer bediente, um dem deutschen Rassismus den Anstrich von Wissenschaftlichkeit zu geben. Insbesondere wurde Haeckel durch ein anscheinend harmloses Postulat bekannt, das man früher den Studenten der Biologie beibrachte: Die Ontogenese (das Werden des Individuums) wiederholt die Phylogenese (das Werden der Art). Mit anderen Worten: Er glaubte, Beweise dafür zu haben, daß die Ontogenese, die Entwicklung eines einzelnen Lebewesens vom Embryonalzustand bis zur Geschlechtsreife, die

Phylogenese nachvollzieht – d. h. die Entwicklung der Art von primitiven zu fortgeschrittenen Formen. Beispielsweise hielt er die platten Nasen und die fehlende Körperbehaarung von Säuglingen für die Wiederholung einer «primitiven Stufe» der Menschheitsevolution, die durch die «niedrigstehende» mongoloide Rasse verkörpert werde. Wenn ein kaukasisches Kleinkind heranwächst, durchläuft es nach Haeckels Vorstellung noch einmal die Evolution, die schließlich in den typischen Zügen der «überlegenen» europäischen Rasse gipfelte. Im Hinblick auf die charakteristischen Symptome des Down-Syndroms (Trisomie 21) unterstellten die Haeckelianer, sie seien Regressionen auf eine frühere Entwicklungsstufe, weshalb sie von «mongoloider Idiotie», bzw. von «Mongolismus» sprachen. Haeckel zerbrach sich auch den Kopf über «Wilde». Ihre Schädel, das behauptete er wenigstens, ähnelten dem Schädel aus dem Neandertal. «Der geistige Abstand zwischen einem Goethe, einem Kant, einem Lamarck oder einem Darwin und den tieferstehenden Wilden ist viel größer als zwischen diesen [Wilden] und den Menschenaffen.» Vor allem Juden – insbesondere russische Juden – gehörten in Haeckels Augen einer so «schmutzigen» und «abartigen» Rasse an, daß er sie kaum zu den Menschen zu zählen vermochte.

Von der Richtigkeit seines Rassismus wie von dessen Verwurzelung in der Natur überzeugt, schuf er aus seinen Ideen das Lehrgebäude einer philosophischen Schule: des Monismus (einer auf der Abstammungslehre fußenden Weltanschauung). Eine Prämisse dieser Schule war die Überlegenheit der «germanischen Rasse», die sich in der Freisetzung machtvoller Kräfte durch natürliche Zuchtwahl im Kampfe mit anderen Rassen offenbarte. Hitler, der das Erbe des Monismus antrat, beschloß kurzerhand, diese anderen Rassen auszurotten.

Sozialdarwinismus, wie ihn die Monisten lehrten, hat aber nicht nur in Nazideutschland, unter Neofaschisten und in der westlichen Welt Unheil gestiftet. Theo Sommer, der Chefredakteur der *Zeit*, der Helmut Schmidt auf dessen Chinareise begleitete, wurde von Mao Tse-Tung empfangen. Zu seiner größten Verblüffung vernahm er von Mao, wie sehr dieser sich Haeckels Ideen verpflichtet fühlte. Durch Haeckels Monismus davon überzeugt, ohne den ständigen Druck der natürlichen Zuchtwahl werde die Menschheit entarten, war Mao für das Prinzip der Revolution ohne Ende begeistert worden, die mein Vaterland an den Rand des Ruins brachte.

Natürlich kann Darwin nicht für den Mißbrauch verantwortlich gemacht werden, den man mit seiner Lehre und seinem Namen trieb. Wie George Bernard Shaw (1856–1950) witzelte, hatte Darwin nur «das Glück, jedem zu gefallen, der eine Axt zu wetzen verstand». Darwin war sehr wohl bewußt, daß man seine Ideen mißbrauchen konnte. So beklagte er sich kurz nach der Veröffentlichung seines *On the Origin of Species* scherzhaft in einem Brief an einen Kollegen: «In einer Zeitung in Manchester habe ich einen saftigen Verriß bekommen, der nachweist, ich hätte erklärt, wer die Macht habe, habe auch recht. Deshalb habe Napoleon recht gehabt und jeder betrügerische Krämer auch.»

Doch jeder kann sich fragen, und insbesondere Naturwissenschaftler sollten das tun, ob das «Gesetz» vom Überleben des Tüchtigsten wirklich ein Naturgesetz ist, ja ob es überhaupt mit Naturwissenschaft zu tun hat. Die allgemein akzeptierte Probe aufs Exempel, ob eine Idee Bestandteil der Naturwissenschaft oder eher einer Ideologie ist, ist folgendermaßen beschaffen: Um als naturwissenschaftlich bestehen zu können, muß – nach Popper – eine Theorie überprüfbar sein. Mit anderen Worten: Es muß Experimente bzw. Untersuchungs- oder Beobachtungsmethoden geben, die – falls ihre Ergebnisse nicht den Thesen der fraglichen Theorie entsprechen – die betreffende Theorie als falsch erweisen.

Das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein derartiger Überprüfungsmethoden spielte 1982 bei jenem Prozeß in Arkansas eine entscheidende Rolle, bei dem der Richter William Overton entschied, daß der Kreationismus (die «Schöpfungslehre» oder «Schöpfungswissenschaft», wie die Anhänger dieser Lehre sie nennen) nicht als Naturwissenschaft zu betrachten sei. Ein Jahr lang – seit 1981 – hatte ein «Gleichbehandlungsgesetz» (Balanced Treatment Act) die Voraussetzung dafür geschaffen, daß in den Lehrplänen der öffentlichen Schulen des Staates Arkansas der biblischen Schöpfungstheorie ebensoviel Zeit und Raum gegeben wurde wie der darwinistischen Evolutionslehre. Der «Schöpfungslehre» zufolge ist «die Bibel das geschriebene Wort Gottes, und weil wir [die Kreationisten] sie für ganz und gar [göttlich] inspiriert halten, sind all ihre Angaben in sämtlichen Originalhandschriften [für uns] historisch und naturwissenschaftlich wahr. Für den Naturwissenschaftler bedeutet dies, daß der Schöpfungsbericht im [biblischen] Buch Genesis [1. Mos., Kapitel 1 und 2] eine sachlich zutreffende Darstellung der einfachen historischen Wahrheit enthält.»

Der «Amerikanische Verband für Bürgerfreiheiten» (American Civil Liberties Union) brachte die Angelegenheit aufgrund der in der US-Verfassung festgeschriebenen Trennung von Kirche und Staat vor Gericht. Richter Overton hatte also zu entscheiden, ob die «Schöpfungswissenschaft» tatsächlich als allgemein verbindliche Naturwissenschaft oder als religiöse Glaubenslehre anzusehen sei.

Geradezu wie Ironie mutet es an, daß die Zeugen der Verteidigung selbst ihre Position untergruben. So äußerte ein Anhänger der Schöpfungslehre, es sei «unmöglich, eine naturwissenschaftliche Versuchsanordnung zu entwickeln, um den Schöpfungsbericht zu beweisen oder auch nur eine Aussage zu machen, ob ein solcher Vorgang überhaupt stattfinden kann.» Ein anderer erklärte: «Wir sind außerstande, mit Hilfe naturwissenschaftlicher Forschungen eine Aussage über die Schöpfungsprozesse zu machen, welcher sich der Schöpfer bediente.» Und ein dritter Zeuge der Verteidigung fügte hinzu: «Er [d. h. der Schöpfer] wandte Prozesse an, die heute nirgendwo im Universum mehr wirksam sind.»

Mit ihrer Erklärung, es bestünde keinerlei Möglichkeit, die Schöpfungslehre zu falsifizieren, hatten sich deren Anhänger selbst ins wissenschaftliche Abseits gegeben. Richter Overton blieb keine andere Wahl, als zu erklären,

daß die Schöpfungs-«Wissenschaft» mit Naturwissenschaft jedenfalls nichts zu tun habe. Bei diesem Gerichtsverfahren kam nicht zur Sprache, ob Darwins Theorie der natürlichen Zuchtwahl als naturwissenschaftlich einzuschätzen sei. Wie steht es mit ihr? Läßt sie sich falsifizieren?

Der Wissenschaftsphilosoph Karl Popper, dessen Kriterien es waren, nach denen in Arkansas die Behauptungen der Anhänger der Schöpfungslehre zurückgewiesen wurden, sah dies nicht so. Popper zufolge stellt Darwins Theorie einfach den Versuch dar, einen historischen Vorgang zu deuten – die Geschichte des Lebens auf der Erde. Da aber Geschichte unwiederholbar ist (beispielsweise ist keinerlei Versuchsanordnung denkbar, um nachzuweisen, ob irgendeine bestimmte Theorie über den Untergang Roms zutrifft), vertrat Popper die Ansicht, alle Versuche, zwischen «historisch richtig» und «historisch falsch» zu unterscheiden, seien eine Sache der Einschätzung und des guten Glaubens.

Gleichwohl gibt es tatsächlich ein paar ganz wenige Tests, die den Nachweis erlauben, daß Darwins Thesen möglicherweise falsch sind. Als unbestreitbar zutreffend hat sich bei diesen Tests die Theorie der allgemeinen Abstammung (allgemeine Deszendenztheorie) erwiesen.

Der überzeugendste Nachweis für die Richtigkeit einer Hypothese ist deren Eignung, Ereignisse und Entwicklungen vorherzusagen. Popper hatte recht, wenn er darauf hinwies, daß eine wissenschaftliche Ansicht, die sich auf bereits bekannte Tatsachen beschränke, nichts als eine historische Interpretation sei. Demgegenüber stimmen die meisten Naturwissenschaftler darin überein, daß eine Theorie, die noch nicht Eingetretenes zutreffend vorauszusagen vermag, damit den Beweis ihrer naturwissenschaftlichen Stichthaltigkeit erbracht hat. Denn eine solche Theorie ist – wieder nach Popper – falsifizierbar, insofern sie vielleicht doch etwas voraussagt, das dann nicht nachweisbar ist, überhaupt nicht eintrifft oder nicht im Einklang mit der Voraussage steht. Andererseits kommt sie mit jeder neuen Entdeckung, die sie bekräftigt, der Wahrheit ein Stück näher.

Sehr zum Mißfallen vieler seiner Zeitgenossen hatte Darwin das Postulat der gemeinsamen Abstammung von Menschen und Affen von gemeinsamen Vorfahren aufgestellt. Als er 1833 erstmals seine Gedanken über die Abstammungslehre notierte, lag noch kein Fund eines Menschen skeletts vor, das in irgendeiner Form vom Knochenbau des *Homo sapiens sapiens* (des «Jetztzeitmenschen») abwich. Darwins Hypothese hatte daher etwas ganz und gar Neuartiges, Schockierendes. Um sie zu bestätigen, mußte man sehr frühe fossile Menschenknochen finden, die affenähnlicher sein mußten als Überreste des heutigen Menschentyps. Das erste *missing link* (das erste «fehlende Bindeglied») kam Ende August 1856 zum Vorschein – drei Jahre, bevor Darwin sein Hauptwerk veröffentlichte und damit der Öffentlichkeit seine Thesen vorlegte. In der Tat hatte die neue «taxonomische Rasse», der Neandertaler (*Homo sapiens neanderthalensis*), etwas Affenähnliches. Als seinerzeit anläßlich einer naturwissenschaftlichen Tagung in Bonn der Schädel und Teile des übrigen Skeletts ausgestellt wurden, zweifelten manche der Gelehr-

ten, daß es sich tatsächlich um Menschengebeine handelte. Andere diagnostizierten an diesem Skelett krankheitsbedingte Degenerationserscheinungen. Der Geologe Sir Charles Lyell (1797–1875) jedoch begriff:

Die neuerdings beobachtete Abweichung vom normalen Standard des menschlichen Körperbaus ist keine zufällige, willkürliche Abartigkeit, sondern genau das, was zu erwarten war, wenn die Gesetze der [biologischen] Veränderung so beschaffen sind, wie es die Transmutationisten [Anhänger der Lehre von der Veränderung der Lebensformen, insbesondere also Darwin] behaupten.

Wenn ein Experiment als Verfahren definiert wird, um eine Hypothese auf ihre Stichhaltigkeit hin zu überprüfen, lassen sich im weiteren Sinne auch wissenschaftliche Programme oder Expeditionen als Experimente bezeichnen, deren Zweck die Bestätigung hypothetischer Voraussagen ist. Seit der Entdeckung des Neandertalers wurden in Europa, Asien und Afrika bis heute zahlreiche gezielte Forschungen nach menschlichen und prähumanen («vormenschlichen») Fossilien durchgeführt. Die Ergebnisse – einschließlich des noch relativ jungen Fundes von «Lucy», des primitivsten Hominiden, dessen Überreste bislang aufgedeckt wurden – waren sensationell. Mehr noch: Sie haben Darwins Voraussagen ausgiebig bestätigt, denn jedes ältere Fossil nähert sich, je älter es entwicklungsgeschichtlich ist, mehr dem anatomischen Erscheinungsbild der Menschenaffen. «Lucy» verkörpert einen kleinwüchsigen Hominiden, dem man die Bezeichnung *Australopithecus afarensis* gab. Sie – denn «Lucy» war weiblichen Geschlechts – lebte vor etwa drei Millionen Jahren und ging bereits aufrecht wie wir. Doch ihren Schädel könnte man leicht mit dem eines Schimpansen verwechseln.

Diese Art von Bestätigungen verschaffte man sich auf die gleiche Art und Weise wie einst zu Darwins Lebzeiten, nämlich durch den makrobiologischen Vergleich von Skeletten. Im Lauf der letzten Jahrzehnte aber war es möglich, mit Hilfe einer sehr weit fortgeschrittenen mikrobiologischen Technologie noch ganz andere Experimente zu entwickeln, um die Tragfähigkeit der allgemeinen Abstammungslehre (der allgemeinen Deszendenztheorie) zu testen. Evolution vollzieht sich durch Veränderungen der Gene, der funktionalen Einheiten der Desoxyribonukleinsäure (DNS), die sich – mit biochemischen und morphologischen Unterschieden – bei allen Arten von Lebewesen nachweisen läßt. Medizinische Gewebebestimmungen, wie sie im Zusammenhang mit Organtransplantationen erforderlich sind, um die Verträglichkeit des Spenderorgans mit dem Organismus des Empfängers festzustellen, verhalfen uns zu einem Indiz für Gen-Differenzen: Je enger zwei Arten miteinander verwandt sind, desto ähnlicher sind die «immunologischen Profile» ihrer Zellen. Doch die Molekularbiologie, welche die DNS selbst untersucht, erbringt nicht allein Schätzwerte für den Grad der Verwandtschaft zwischen Arten, sondern darüber hinaus auch Anhaltspunkte dafür, wieviel Zeit verstrichen sein muß, seit jede der zwei miteinander verwandten Arten ihre eigene Entwicklung weg von dem gemeinsamen Vorfahren begann.

Sowohl die immunologische als auch die molekularbiologische Analyse bestätigten die Verwandtschaft zwischen Menschen, Menschenaffen und Affen. Unsere nächsten Verwandten im Tierreich sind die Schimpansen. Vor sieben Millionen Jahren entwickelten sie sich und wir uns von einem gemeinsamen Vorfahren weg. Zwei Millionen Jahre zuvor hatten die Gorillas begonnen, sich von demselben Ursprungsstamm abzuzweigen. Die anderen Menschenaffen (Orang Utan, Gibbon und Siamang) stehen uns ferner, und dies gilt für alle anderen Affen erst recht.

Das durch Darwins Deszendenztheorie postulierte Muster ergibt sich aus zahllosen anderen Untersuchungen abertausender von Lebensformen. Mit Hilfe der vergleichenden Anatomie entdeckte man in einer Gruppe zweibeiniger und möglicherweise warmblütiger Echsen, die vor 200 Millionen Jahren lebten, die gemeinsamen Vorfahren von Dinosauriern und Vögeln, und mit den Säugern wiederum stehen die Reptilien über säugetierähnliche Echsen – sogenannte *Therapsiden* – in Verbindung, die vor etwa 250 Millionen Jahren die Erde beherrschten. Der Zusammenhang der einzelnen Gruppen von Lebensformen geht bis in die Urzeit zurück – bis hin zu Bakterien, den ältesten uns bekannten Fossilien, deren mikroskopisch kleine Abdrücke man in Felsgestein gefunden hat, das volle drei Milliarden Jahre alt ist. Daß sämtliche Lebensformen, die je existierten, von einem einzigen Ur-Lebewesen abstammen müssen, wird höchst eindrucksvoll durch die DNS selbst demonstriert, denn die chemische «Sprache», mit deren Hilfe sie Lebensvorgänge steuert, ist bei allen Organismen die gleiche.

Erstaunlich genug war, daß Darwin selbst keinerlei Vorstellung von den Mechanismen hatte, mit deren Hilfe bestimmte Wesenszüge weitervererbt wurden, und ebensowenig hatte er eine Ahnung davon, was zur Änderung dieser Wesenszüge führte. Denn von Genen oder gar von der DNS wußte er noch nichts. Und doch wurde sein nun schon ein Jahrhundert altes Postulat der allgemeinen Deszendenz auf geradezu erstaunliche Weise bestätigt, als man im 20. Jahrhundert die Vererbungslehre Gregor Mendels (1822–1884) wiederentdeckte und Crick und Watson in den fünfziger Jahren den universalen Code der DNS-Moleküle entzifferten.

Doch ist damit auch gleichzeitig der Beweis für eine «natürliche Zuchtwahl» erbracht? Zumindest gilt dies für einige ihrer Aspekte! Zuchtwahl setzt die Auswahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Alternativen voraus: Veränderung in der genetischen Beschaffenheit der Individuen ist gleichsam ihr «Rohmaterial». Dasselbe wissenschaftliche Werk, welches die allgemeine Deszendenz hervorhob, unterstreicht zur gleichen Zeit, wie einmalig und einzigartig jeder individuelle Organismus ist.

Aber die natürliche Zuchtwahl setzt auch Anpassung voraus. Die Organismen, die überleben und ihre Gene an ihre Nachkommen weitergeben, sind diejenigen, deren einmalige Genkombination sie für die Lebensweise in ihrem Umfeld am besten geeignet macht – jenem Wirkungs- und Aufgabenbereich, den Biologen als «Nische» bezeichnen. Kennt man die Nische einer

Tierart, so sind Aussagen über die Wesenszüge der betreffenden Art möglich. Sind beispielsweise Männchen und Weibchen einer Vogelart gemeinsam bei der Brutpflege tätig und somit Angriffen von Raubvögeln ausgesetzt, so dürften beide Geschlechter möglichst unauffälliges oder gesprenkeltes Tarngefieder haben, das sie vor ihren Freßfeinden schützt, während sie dem gefährvollen Geschäft des Ausbrütens der Eier nachgehen. Mit auffälligem Gefieder wären sie beim Brutgeschäft stärker durch Angriffe ihrer Gegner bedroht, weshalb sie dann weniger Junge hervorbringen könnten. Daher hat eine Art mit auffälligem Gefieder entweder nur wenige Freßfeinde zu fürchten, oder die Individuen mit den leuchtendsten Federn nehmen an den gefährlichen Aufgaben des Brütens und der Brutaufzucht nicht teil. Feldstudien bestätigen dieses Postulat für Vögel, aber auch für andere Tierarten immer wieder.

Wenn die natürliche Zuchtwahl die Triebkraft der Evolution ist, dann muß etwaigen Veränderungen der Umwelt die Fähigkeit entsprechen, sich hinreichend anzupassen. Das wohl bekannteste Beispiel einer Anpassung an veränderte Umweltbedingungen verdanken wir der in England heimischen «Pfeffermotte». Die Einzelexemplare dieser Art weisen Gen-Unterschiede auf, welche für die Farbe der Flügel den Ausschlag geben. Noch vor wenigen Jahren waren die meisten dieser Tiere fahlfarben und paßten im Farbton zur Rinde der Bäume, an der sie zu sitzen pflegten. Zwar waren auch damals schon ein paar von ihnen dunkel. Doch ihre Anzahl hielt sich in Grenzen, denn sie waren gut erkennbar und dadurch eine leichte Beute für Vögel, die sich von ihnen ernährten. Doch in dem Maße, in dem Ruß aus Farbfabrikaten die Baumrinden schwärzte, nahm der Anteil der dunkleren Motten zu. Die paar, die auch heute noch fahl sind, heben sich leichter von den inzwischen dunkler gewordenen Rinden ab, und nun sind sie es, die um so leichter ihren Freßfeinden zum Opfer fallen. Man sollte meinen, derartige Fallbeispiele – und es gibt viele davon – sollten es uns ermöglichen, die Akten zum Thema «natürliche Zuchtwahl» zu schließen. Keine Frage – die Fittesten, Überlebensfähigsten überleben!

Aber wie werden sie zu neuen Arten? Schon Darwin war klar, daß in einer Tierpopulation wie der der englischen Pfeffermotten die bloße Anpassung noch keineswegs zu einer Artveränderung geführt hat, denn auch in der Anpassung an Umweltveränderungen wandeln sich die Wesenszüge einer Art erst im Laufe langer Zeitspannen. Damit neue Formen entstehen, so wie sich beispielsweise einst Gorillas und Hominiden von einem gemeinsamen Ahnenstamm abzweigten, müssen vielmehr einige Individuen mit Abweichungen, die nicht innerhalb der Gesamtpopulation unbedingt lebensnotwendig sind, reproduktionsmäßig von ihren Artgenossen isoliert werden, und dies nun wieder unter Umständen, unter denen die für sich charakteristischen Normabweichungen eine entscheidende Rolle fürs Überleben spielen. Für Darwin waren die Galapagosinseln geradezu ein Lehrstück der Artenbildung. Jede dieser Inseln ist von den anderen durch weite Wasserflä-

chen getrennt, und jede Insel weist hier ihre eigene, für sie charakteristische Mikro-Ökologie auf, die sie von allen anderen Inseln zum Teil erheblich unterscheidet. Und hier wurden versprengte «Flüchtlinge», die es vom Festland auf diese Eilande verschlagen hatte, wobei sie manchen Sturm getrotzt haben müssen, fortpflanzungsmäßig isoliert. Unerheblich ist, welche für das Leben auf den Inseln vorteilhaften Gene sie bereits vom Festland mitgebracht haben mögen oder welcher für das Inselleben vorteilhafte Genwandel sich erst auf den Eilanden selbst vollzog – auf jeden Fall erwiesen sie sich als brauchbar im Sinne der Anpassung an das Leben in dieser neuen Umwelt mit seinen charakteristischen Gegebenheiten und Erfordernissen. Beispielsweise werden die Galapagosinseln von zahlreichen Arten der Darwinfinken bewohnt, deren jede ihrer eigenen Nische angepaßt ist; all diese Arten stammen von einer einzigen Art ab, die auf dem Festland heimisch ist und dort keine vergleichbaren Varianten hervorbrachte.

Seit dieser Ur-Studie über die Artenentwicklung wurden auch noch andere Mechanismen der fortpflanzungsmäßigen Isolation festgestellt. Am bedeutendsten ist vielleicht die sexuell bedingte Selektion – mit anderen Worten: die Weigerung weiblicher Exemplare, sich mit jedem männlichen Individuum zu paaren. Doch diese Entdeckung verschiedener Mechanismen der Artenbildung wirft wiederum neue Fragen auf. Darwins und Wallaces malthusianische Geistesblitze bedeuteten einen Sprung von der Mathematik der Bevölkerungsexplosion hin zur Mathematik der Artwerdung. Zwar zeugen sämtliche Organismen in aller Regel viel zu viele Nachkommen und könnten sich daher nahezu unbegrenzt vermehren, doch sind ihren Vermehrungsquoten durch Sterblichkeitsraten Schranken gesetzt, und neue Arten gar bringen sie nur unter ganz speziellen Bedingungen hervor. Mehr noch: Wo die Artwerdung erfolgreich vonstatten zu gehen scheint, wie in den tropischen Regenwäldern am Amazonas, schafft jede neuartige Version eines Organismus für sich eine neue Nische. Im Gegensatz zu Darwins diesbezüglicher Voraussage scheint also der «Keil» ihrer Anpassung keine nahestehenden, verwandten und benachbarten «Keile» aus dem Wege geschlagen zu haben, vielmehr werden die Gesamtressourcen der Umwelt immer wieder auf neue und andere Arten und Weisen aufgeteilt.

Eine Analogie hierzu bietet in der Tat die kapitalistische Wirtschaft, obwohl Carnegie und Rockefeller sie als schlagenden Beleg für das «Gesetz» vom Überleben des Tüchtigsten im Existenzkampf ansahen. So hat beispielsweise das Aufblühen der Autoindustrie nicht nur innerhalb des Wirtschaftslebens eine neue Nische geschaffen, sondern auch Nischen für die Gummi-, Stahl- und Erdölindustrie. Auch die Artenneubildung schafft innerhalb einer Gruppe günstige Bedingungen für die Spezialisierung innerhalb anderer Gruppen. Neuentstandene Pflanzenarten beispielsweise lassen sich nur nutzen, wenn sich pflanzenfressende Tiere entsprechend anpassen, und neue Arten von Pflanzenfressern wiederum können nur die Beute neu angepaßter Raubtiere werden. Das Phänomen der gemeinsamen Entwicklung (Koevolution) – daß zum Beispiel eine neue Insektenart eine neue Orchideenart be-

stäubt – scheint weit verbreitet zu sein. Wettbewerb – etwa daß zwei Insektenarten um den Nektar einer einzigen Blumenart kämpfen oder zwei Blütenpflanzen um eine bestimmte Art von Bestäubern – ist demgegenüber allem Anschein nach ziemlich selten. Viel eher ist der Kampf, in den ein einzelnes Individuum sich verwickelt sehen mag, ein Kampf mit der Natur. Die Motten in England, von denen oben die Rede war, haben keinen Streit miteinander. Ihre relative Überlebenstauglichkeit hängt von der Farbe der Baumrinde und der Sehschärfe gewisser Vögel ab.

Derartige Beobachtungen veranlassen viele Naturwissenschaftler zu der Annahme, daß Darwins Theorie der natürlichen Zuchtwahl in einem ihrer Hauptpunkte verfälscht worden sein muß. Zwar mag natürliche Zuchtwahl die Triebkraft der Evolution sein, doch nicht Konkurrenz liegt ihr zugrunde, und es trifft auch nicht zu, daß die Geburt einer neuen Art automatisch das Todesurteil für eine alte bedeutet.

Das macht aber das Problem des Artensterbens bei weitem komplizierter als Darwin vermutete. Man denke beispielsweise an die Dinosaurier: Träfe Darwins Postulat eines Konkurrenzkampfes um identische oder einander sehr ähnliche Nischen zu, dann wäre die Rate der Artenneuentstehung – wie er voraussagte – vollkommen durch die Aussterberate ausgeglichen. Doch dann gingen auf einmal alle Dinosaurier zugrunde. Keine Dinosaurierfossilien wurden je in Sedimenten gefunden, die jünger sind als die Kreideschichten von Maastricht. War es das Auftreten der Säugetiere, das den riesigen Schreckensechsen ein Ende bereitete? Nur wenige zogen das ernsthaft in Betracht. Die paar Säuger, die es damals schon gab und deren Nischen sich kaum mit denen eines *Tyrannosaurus* oder eines *Trikeratops* überlagert haben dürften, können derartigen Giganten beim besten Willen kaum gefährlich gewesen sein!

Statt dessen müssen wir uns darüber klarwerden, wo der Konkurrenzkampf tatsächlich stattzufinden scheint: nämlich in der Konfrontation zwischen einem Organismus und seiner Umwelt. Darwin wußte sowohl von seinen fossilen Befunden wie von Beobachtungen an domestizierten Tier- und Pflanzenformen her, daß die Evolution viel Zeit braucht. Ein einzelnes Individuum vermag in seiner kurzen Lebensspanne keinen Artenwandel herbeizuführen. Beispielsweise kann ein Organismus nicht beschließen: Das Klima wird trockener, also werde ich am besten ein Kamel. Vielmehr vollzieht sich der Wandel bei trockenem Klima durch viele Generationen hindurch und über einen langen Zeitraum hinweg. Individuen, die ein bestimmtes Maß von Austrocknung vertragen (oder biologisch geeignet sind, es zu vermeiden), sind in dieser Zeit gegenüber anderen, die diese Fähigkeiten nicht besitzen, im Vorteil: Sie können sich vermehren und ihre Erbeigenschaften weitergeben, während andere Tierarten in der Hitze und Dürre zugrundegehen. Zweifellos kommt Artensterben zu allen Zeiten vor, denn selbst die langsamen Veränderungen, denen die Umwelt überall auf der Erde unterworfen ist, vollziehen sich bisweilen in einem zu raschen Tempo, als daß die Artenanpassung Schritt halten könnte.

Doch zeigt der geologische Befund, daß es völlig verschiedene Phasen im Verlauf der Evolution gibt. So gibt es Ruhezeiten, während derer die meisten Arten unverändert bleiben oder doch zumindest die Zahlen der neuentstehenden und der aussterbenden Arten einander die Waage halten. Dann wieder treten Phasen fast hektisch wirkender Aktivität auf: Phasen rascher Artenentstehung oder noch sehr viel rascheren Artensterbens. Doch verlaufen diese Ereignisse nicht synchron. Zuerst gibt es vielmehr ein Massensterben wie bei den Dinosauriern. Darauf folgt dann eine Pause, in der sich die Überlebenden genau so verhalten, wie Malthus es vorhergesagt hatte: Sie vermehren sich wie die sprichwörtlichen Kaninchen. Danach aber folgt eine Phase rascher Spezialisierung – manchmal geht diese so rasch vor sich, daß man von einem «explosionsartigen» Evolutionsschub sprechen kann.

Wenn man untersucht, wie sich Umweltveränderungen zu einem solchen Muster verhalten, zeichnet sich ein interessanter Zusammenhang ab. Es sind sehr rapide Veränderungen, welche die Rate des Aussterbens über die Artenbildungsrate hinaus anwachsen lassen, denn es gibt eine Grenze dafür, wie rasch sich ein Organismus entwickeln kann, um mit der Veränderung der Umweltbedingungen Schritt zu halten. Unter solchen Umständen hat das Aussterben alter Arten nichts mit deren angeblichem Konkurrenzkampf gegen neu entstandene Arten zu tun. Eher deutet es auf die Unfähigkeit hin, sich den veränderten Verhältnissen im ökologischen Umfeld anzupassen. Darwin irrte sich, wenn er so stark die Rolle biotischer Interaktionen (der Wechselbeziehungen zwischen den Arten im Sinne eines Arten-Wettkampfes) betonte.

Den Umweltveränderungen und vor allem dem Tempo, mit dem sie sich vollziehen, kommt also entscheidende Bedeutung zu, wenn man nach den Gesetzmäßigkeiten des Artensterbens forscht. Je rascher Umweltveränderungen vor sich gehen, desto höher ist auch die Rate des Aussterbens. Wenn man diese Linie weiterverfolgt, so scheint es möglich, daß es eine drastische Umweltkatastrophe war, die zum Aussterben all der wundervollen Tiere führte, deren kolossale Überreste Paläontologen im Laufe des letzten Jahrhunderts freilegte. Und wenn tatsächlich eine Katastrophe die Ursache dieses Massensterbens (und anderer Massenausrottungen fossiler Tierarten) war, dann wäre Darwins «Gesetz» schon im Ansatz suspekt. Denn was heißt «Überlebenstauglichkeit», wenn wir aufgrund der Untersuchung von Überresten früherer Lebensformen und heutiger Arten überhaupt nicht voraussagen können, welche von ihnen überleben und welche nicht?

Dies ist die endgültige Probe aufs Exempel, was das «Gesetz» vom Überleben der Fittesten, Überlebenstauglichsten, Tüchtigsten betrifft. Zwar können wir sagen, daß Tauglichkeit das Kriterium für die Fähigkeit zum Überleben ist, und wir können Tauglichkeit als den Grad definieren, bis zu dem sich ein Individuum seiner gegenwärtigen Nische angepaßt hat. Und aufgrund unserer Beobachtungen können wir sagen, welches einzelne Individuum etwa die bessere Chance hat, beispielsweise eine vorübergehende

Dürre zu überleben. Aber können wir auch sagen, welche Art insgesamt die Fähigkeit besitzt, sich rasch genug entwicklungsmäßig anzupassen, um für sich eine neue Nische zu schaffen, falls sich die Verhältnisse durch eine Katastrophe ändern? Selbst wenn wir in der Lage wären, den Charakter und den Ablauf einer künftigen Katastrophe abzuschätzen – könnten wir dann aber auch die Beschaffenheit der Nische voraussagen, die vielleicht als Folge von ihr entsteht? Heute gibt es keine Nische für pflanzenfressende Schlangen. Doch wenn wir – rein hypothetisch – von einer Katastrophe ausgingen, durch die Nagetiere und Insekten drastisch dezimiert würden, so fiel es uns dennoch schwer, im Hinblick auf die Überlebentauglichkeit einer Schlange vorauszusagen, ob sie in der Lage wäre, sich gewissermaßen von einem Augenblick auf den anderen auf Algen umzustellen. Wir vermöchten nicht einmal auszurechnen, welche Chancen ein volles Tausend von Schlangengenerationen hätte, sich eine solche Nische zu schaffen, um dem Aussterben zu entgehen.

Das «Gesetz vom Überleben des Tüchtigsten» ist daher möglicherweise nur eine Tautologie – insofern Tüchtigkeit durch die bloße Tatsache des Überlebens definiert wird, nicht aber durch unabhängige Kriterien. Dieses «Naturgesetz», das für so manches Schlimme und Verwerfliche als «wissenschaftliche» Rechtfertigung erhalten mußte, läßt sich sogar als nachweislich falsch entlarven: Wenn es überwiegend Katastrophen sind, die das Artensterben auslösen, dann bestimmt der Zufall, nicht die bessere Eignung, wer am Leben bleibt und wer stirbt. Tatsächlich unterliegt ja vielleicht der gesamte Ablauf der Evolution dem Zufall, und sie spiegelt keineswegs jenen langsamen, mühsamen Marsch von niederen zu höheren Formen, wie es sich die Menschen des Viktorianischen Zeitalters in ihrem Fortschrittsglauben so gern vorstellten – eine Vorstellung, die überhaupt im Denken des Westens tief verankert ist.

Wieder fallen mir die Widersprüche meiner Kindheit und meines späteren Lebens ein – eines Lebens, das sich jetzt, da ich diese Zeilen zu Papier bringe, auf drei nationalen Ebenen abspielt, die für mich gleichrangig sind. Die ersten 19 Jahre dieses Lebens brachte ich in China zu, während der nächsten 19 Jahre studierte und arbeitete ich in Amerika, und anschließend kam ich in die Schweiz, wo ich ebenfalls schon wieder seit 19 Jahren lebe und arbeite. Die Bewohner jedes dieser drei Länder haben ein Lieblings-Kartenspiel, und die betreffenden Spiele spiegeln vielleicht den Nationalcharakter oder die Volksweisheit derer wider, die sie spielen. Die Chinesen spielen besonders gern Mah-Jongg, ein Spiel der Anpassung. Jemand, der zu halsstarrig ist, um sich in das Unvermeidliche zu fügen, gerät bei diesem Spiel unweigerlich ins Hintertreffen. Man gewinnt, indem man Vorteil aus dem zieht, was einem zufällt. Das Glück, so sagen die Chinesen, lächelt einem nicht zweimal, doch es kann zu jedem kommen, und in Übereinstimmung mit der taoistischen und buddhistischen Philosophie, zwei Richtungen, in deren Denken die inneren Werte jeglicher Lebensform und Lebensweise eine zentrale Rolle spielen, kann jeder die Chancen nutzen, die sich ihm bieten.

Die Amerikaner spielen Poker, ein Spiel, das Machtdenken symbolisiert. Man kann durch Bluffen (eben durch «Pokern») gewinnen, doch dieses Bluffen funktioniert letztlich nur, wenn die Karten stimmen. Man gewinnt durch Stärke – mit anderen Worten: auf amerikanische Art. Ich lernte Poker während meiner Zeit in Amerika, als der Glaube der Amerikaner an ihre Überlegenheit schwer auf die Probe gestellt wurde. Die westliche Philosophie, geprägt durch Darwins Sicht des Konkurrenzkampfes zwischen Individuen und «Rassen» unterschiedlichen Wertes, befand sich damals in einer unerbittlichen Zerreißprobe. Doch weder der Glaube an die Macht noch die Liebe zum Pokern sind den Amerikanern abhanden gekommen.

Das Nationalspiel der Schweizer ist Jass. Nie werde ich jene Jass-Partie vergessen, die wir am 23. August 1968 in Prag spielten, als dort gerade die Russen einmarschierten. Ein eidgenössischer Jassmeister und ich bildeten ein Team gegen meine Frau und einen Amerikaner, die beide keine Jass-Experten waren. Den ganzen Abend spielten wir in unserem Hotelzimmer, während draußen auf der Straße die Gewehrkugeln pfften. Wie das Spielerglück es wollte, gewannen die beiden Anfänger mit großem Vorsprung. Beim Jassen spielt Glück eine dermaßen wichtige Rolle, daß sich der Ausgang einer Partie nie vorhersagen läßt – und dies immer unabhängig vom spielerischen Können der Teilnehmer.

Manche betrachten es als ein Glück, als Schweizer geboren zu sein. Ich sehe die Sache allerdings genau umgekehrt: Wenn einer Schweizer ist, muß er viel Glück haben, denn es bestehen relativ wenige Chancen, in diesem Lande voranzukommen, wenn man nicht schon von Geburt an zur richtigen Gesellschaftsschicht gehört.

So haben wir es hier mit drei ganz verschiedenen Auffassungen von Glück und Erfolg zu tun: Glück und Erfolg kommt erstens zu denen, die ihr Schicksal in ihre eigenen Hände nehmen und ihre Konkurrenten zu übertreffen versuchen; Erfolg fällt einem zweitens ganz allein als Glück zu und es liegt nicht in unserer Macht, ihn zu zwingen; Erfolg fällt drittens denen zu, die zwar Mißgeschick fügsam zu ertragen wissen, aber auch aus jedem Glücksfall Vorteil zu ziehen verstehen. So kann man auch den Erfolg bei der Evolution als Poker, Jass oder Mah-Jongg auffassen: als Ergebnis von Stärke, als Resultat bloßer Zufälle oder als Konsequenz von Flexibilität. Ich neige zu der Auffassung, daß meine drei mal neunzehn Jahre in verschiedenen Erdteilen und unter der Einwirkung völlig unterschiedlicher Betrachtungsweisen meine Fähigkeit zur Beurteilung erweitert haben, ob und inwieweit derartige Wertsysteme unser Bild von der Geschichte des Lebens verzerrt haben.

Keiner der drei Nationen, zu denen ich auf die eine oder andere Weise gehöre, möchte ich vor den anderen den Vorzug geben. Und ich möchte auch nicht darüber entscheiden müssen, warum mein Nachbar und ich es wohl verdient haben, den Zweiten Weltkrieg zu überleben, in dem so viele Millionen Menschen umgekommen sind. Ich weiß auch nicht, wessen persönliche Qualitäten dem einen oder anderen von uns beiden das Überleben eines

nuklearen Holocausts garantieren würden. Als Naturwissenschaftler sehe ich statt dessen eine Chance, unter derartigen Beurteilungen die Rechtfertigung der Naturwissenschaft aufzudecken. Und ich bleibe dabei: Das «Gesetz» der natürlichen Zuchtwahl hat nichts mit Naturwissenschaft zu tun. Es ist nichts als eine Ideologie, und noch dazu eine verwerfliche – eine Ideologie, die offenbar unsere Fähigkeit beeinträchtigt hat, die Geschichte des Lebens mit der erforderlichen Klarheit zu sehen, ebenso wie sie auch unserer Fähigkeit geschadet hat, einander zu tolerieren.

Dieses Buch wird die vorliegenden Befunde über eine der meistdiskutierten Phasen weltweiter Katastrophen diskutieren – Katastrophen, die vom größten Massensterben der Erdgeschichte begleitet waren. Um defekte Blöcke aus dem Fundament unserer Naturwissenschaft auszusondern, bediene ich mich eines historischen Ansatzes, indem ich versuche, die Forschungen von Geologen, Paläontologen und Physikern sowie deren Auswirkung auf unser Denken über die Entwicklung des Lebens nachzuzeichnen. War es der Kampf um einen Platz an der Sonne, der über das Schicksal der Dinosaurier entschied – oder waren störende Einflüsse äußerer Ereignisse am Werk, welche die Lebensweise der Riesenechsen so beeinträchtigten, daß es zu ihrem Aussterben kam? Waren die, die das überlebten, die «Tüchtigsten» – oder hatten sie nur einfach mehr Glück?

Gestern grenzenlose Meere – heute Maulbeerbäume

Gestern grenzenlose Meere – heute Maulbeerbäume, das ist eine Floskel, die ich oft als Kind am Ende langer Erzählungen meiner Eltern hörte. Sie beklagten die rücksichtslosen Veränderungen, welche die Zeit mit sich gebracht hatte. Ich weiß nicht, aus welcher Quelle diese chinesische Weisheit stammt, doch einem heutigen Geologen ruft sie etwas sehr Wesentliches ins Gedächtnis: Die Zeit ist lang. Unser Planet ist mehr als 4,5 Milliarden Jahre alt. Und im Laufe der Zeit werden Gebirge abgetragen, so daß Ebenen entstehen. Die Ebenen versinken im Meer, dafür hebt sich dann der Meeresboden und wird zu trockenem Festland; wo einst der Ozean wogte, gedeihen nun Maulbeerbäume.

Als ich meine Heimat verlassen hatte, um an einer Universität Geologie zu studieren, stieß ich bald auf ein Zitat des Chevalier de Lamarck (1744–1829), das gleichsam eine moderne Version der alten Spruchweisheit meiner Familie darstellt:

Auf diesem Erdball, auf dem wir wohnen, ist alles beständigem und unvermeidlichem Wandel unterworfen. Dieser ergibt sich aus der den Dingen eigenen Ordnung und vollzieht sich mehr oder weniger rasch oder langsam – ganz nach der unterschiedlichen Natur der Objekte, um die es dabei geht. Dennoch spielen sie sich in einem bestimmten Zeitraum ab. Für die Natur ist die Zeit nichts, und sie bereitet auch nie Schwierigkeiten. Sie [die Natur] hat immer Zeit zur Verfügung, und diese ist für sie ein grenzenloses Medium, mit dessen Hilfe sie ihre größten und geringsten Werke vollbringt.

Jean-Baptiste de Lamarck schrieb dies gegen Ende des achtzehnten Jahrhunderts, als der westliche Zeitbegriff eine Revolution erfuhr, die einen ebenso tiefen Eingriff bedeutete wie später Darwins Begriff der Artenentstehung, dessen Wurzeln ja gleichfalls in den letzten Jahrzehnten des Zeitalters der Aufklärung zu suchen sind. Daß man die «Abgründe der Zeit» wahrnahm, welche ihre Spuren in den Fossilien und Formationen der Erdkruste hinterlassen hatten, ermöglichte es der Wissenschaft überhaupt erst, sich aus dem festen Griff der biblischen Lehren zu befreien.

Heute fällt es uns schwer zu begreifen, wie sehr die christliche Lehre damals noch alle Lebensbereiche durchdrang und wie tief die gefühlsmäßige Bindung war (und sei es, daß diese nur in der Angst vor Verfolgung bestand),

welche die Menschen veranlaßte, die Schöpfungserzählung im biblischen Buch *Genesis* (1. Mos.) wörtlich zu nehmen. Seit etwa einem Jahrhundert glaubte die christliche Welt, die Erde sei am 26. Oktober des Jahres 4004 v. Chr. morgens um 9 Uhr erschaffen worden. Von diesem Datum ausgehend, berechnete man mit penibler Sorgfalt anhand der biblischen «Stammtafeln» bzw. «Geschlechtsregister» (Aufzählungen der angeblich seit Adam und Eva vergangenen Generationen), daß die «Sintflut» am 18. November 2349 v. Chr. ausgebrochen sein muß. Die meisten Zeitgenossen Lamarcks hatten daher einen sehr engen Zeitbegriff. Für sie bestand die Erde erst seit wenigen Jahrtausenden. Lamarcks Vorstellung von der Zeit als «Medium ohne Grenzen» war für sie nicht nachvollziehbar.

Die Krönung seiner Laufbahn als Naturwissenschaftler war für den Chevalier Jean-Baptiste de Lamarck, als er 1793 vom Französischen Nationalkonvent in Paris eine Professur für Zoologie erhielt. In seinen Zuständigkeitsbereich fielen auch wirbellose Tiere wie Insekten, Mollusken, Würmer und schließlich Mikroorganismen. Zwei Jahre später, im Jahre 1795, veröffentlichte James Hutton (1726–1797), ein schottischer Arzt, der sich mehr der Untersuchung von Felsgestein als seinen Patienten widmete, die verblüffenden Folgerungen, zu denen er gelangt war, nachdem er sich jahrelang mit dem anstehenden Fels rings um Edinburgh beschäftigt hatte. Auf seiner Veröffentlichung fußte, was später Lamarck über die Zeit und die Natur äußerte. Hutton hatte entdeckt: Der Vorgang der Erosion alten Felsgesteins und der Bildung neuer Gesteinsformationen hatte sich so oft wiederholt, daß er «keine Spur eines Anfangs» und «keine Aussicht auf ein Ende» entdecken konnte. Innerlich, so bekannte er, werde ihm «schwindelig beim Blick in einen derartigen Abgrund von Zeit.»

Die Fähigkeit zu begreifen, was Zeit im Sinne der Geologie ist, stellt sich nicht ohne weiteres ein. Unser eigener Zeitbegriff orientiert sich in der Regel an unseren persönlichen Erfahrungen mit Zeitabläufen. Eine meiner früheren Kindheitserinnerungen besteht darin, daß mich der Ausdruck «vor einiger Zeit» völlig in Verwirrung brachte.

Ich war noch viel zu jung, als meine schulische Erziehung begann, denn meine Eltern wünschten, ich sollte in eine Klasse mit meiner Schwester gehen, die zwei Jahre älter als ich war. Ich war daher noch gar nicht schulreif. Was uns die Lehrerin erzählte, verursachte mir traumatische Erlebnisse. Dies gilt insbesondere für ihre Berichte über Südchinas Eroberung durch die Mandschus, die im 17. Jahrhundert stattgefunden hatte. Trotz tapferer Verteidigung durch ihre Bewohner waren diese Barbaren in meine Heimatstadt Yangtzhou eingedrungen und hatten dort drei Tage und drei Nächte lang geplündert, vergewaltigt und gemordet. Nur wenige Einwohner waren mit dem Leben davongekommen. Die Mandschuinvasion wurde als Stück auf der Schulbühne gegeben. Den Schluß des Stücks konnten meine Schwester und ich allerdings nicht mehr erleben, denn unser Rikschafahrer holte uns ab, als gerade der Herold mit der Neuigkeit die Bühne betrat, die Mandschus

hätten «vor einiger Zeit» die Stadt Hwaiyin erobert (wo sich damals gerade mein Vater befand). Als ich nach Hause kam, rannte ich sofort zu meiner Mutter. Zwar brachte ich es nicht übers Herz, ihr meine Furcht zu gestehen, mein Vater könnte umgebracht worden sein, doch bat ich sie, mir bei der Abfassung eines Briefes an ihn zu helfen:

Lieber Vater,

wie geht es Dir? Uns geht es gut.

Vorgestern hat es geregnet, und unser Dach hatte ein Loch. Hast

Du die Mandschus gesehen?

Dein Jinghwa.

Als mir meine Mutter eine Woche später einen Brief meines Vaters aushändigte, war ich übergücklich. Natürlich hatte er sich gefreut, von mir ein Lebenszeichen zu bekommen, aber die Frage nach den Mandschus war ihm rätselhaft. Nein, er hatte sie nicht gesehen. Sie waren ja schon vor langer Zeit gekommen – um genau zu sein: vor 289 Jahren!

Die meisten Naturforscher des 18. Jahrhunderts waren für die Erdzeitalter ebenso blind, wie ein Kind für die historische Zeit blind sein kann. Während einer naturwissenschaftlichen Debatte über die Art und Weise, wie Flüsse tiefe Täler bilden können, erklärte George Bellas Greenough, Begründer und erster Präsident der Londoner Geologischen Gesellschaft, mit vor Zorn bebender Stimme: «Kein Fluß hat je sein Bett auch nur einen Fuß tiefer gegraben. Keine Zeitspanne ist lang genug, damit die Natur Wunder vollbringen könnte!» Der alte Mann hatte weit länger als ein halbes Jahrhundert an der träge dahinfließenden Themse gewohnt, doch von einer Vertiefung des Themse-Bettes hatte er – logischerweise – nichts bemerkt. Außerdem konnte er sich überhaupt nicht vorstellen, daß die Zeitspanne eines Menschenlebens nur ein Sekundenbruchteil im gewaltigen Strom der geologischen Zeit ist, die es tatsächlich der Natur möglich macht, «Wunder zu wirken».

Lamarck dagegen hatte dies begriffen. Er, der Botaniker war, hatte anfangs wenig Ahnung von Tieren und noch weniger von Gesteinen, aber obwohl er schon in sein fünfzigstes Lebensjahr ging, fühlte er sich nicht zu alt, um sich mit neuen Wissenschaften vertraut zu machen und sich auch genug von der Geologie anzueignen, die gerade damals eine grundlegende Umwälzung erfuhr. Er studierte die Muschelsammlungen der Pariser Universität und entdeckte auch tatsächlich Unterschiede zwischen fossilen und rezenten («modernen», «jetztzeitlichen») Exemplaren. Die Unterschiede waren regelmäßig genug, so daß sie ihm eine Klassifikation erlaubten, je nachdem ob die einzelnen Stücke mehr den Schalen noch lebender Mollusken ähnelten oder einfach untereinander Ähnlichkeiten aufwiesen. Das Ergebnis waren Muschelreihen (Serien, Sequenzen), zwischen denen Lamarck biolo-

gische Verwandtschaftsbeziehungen zu entdecken glaubte. Auf dieser Grundlage formulierte er eine Theorie von der Transmutabilität der Arten, die auf Darwins spätere Evolutionstheorie vorauswies und vieles von ihr vorwegnahm. Aus Lamarcks Sicht konnten Tierpopulationen, die ursprünglich einer bestimmten Art angehört hatten, über lange Zeit hinweg eine Artumwandlung durchlaufen, so daß es schließlich neue Arten gab, die sich deutlich von der alten unterschieden. Diese Veränderungen, so postulierte er, vollzogen sich über große Zeitspannen hinweg. Lamarck, der eher in den Größenordnungen James Huttons als in denen der Bibel dachte, konnte sich vorstellen, daß sehr lange Generationsfolgen ins Land gingen, bevor die Artumwandlung vollendet war.

Sowohl Hutton (als Geologe) als auch Lamarck (als Zoologe) vertraten eine Auffassung, die als Aktualismus in die Wissenschaftsgeschichte eingehen sollte. Selbst die gewaltigen, tiefgreifenden Umwälzungen wie die Umwandlung ehemaligen Meeresbodens in blühende Obstgärten oder die Umwandlung bizarrer, auf uns fremdartig wirkender Schalentiere in die heutigen Muscheln waren für Lamarck das Ergebnis fast unmerklicher Veränderungen (Modifikationen), bei denen die gleichen Naturkräfte wirkten, die noch heute am Werk sind. Für beide – Lamarck und Hutton – war diese Gleichförmigkeit, diese Uniformität der Ursachen geradezu die Grundlage moderner Naturwissenschaft. Beispielsweise äußerte Hutton: «Wenn ein Stein, der heute zu Boden fällt, sich morgen in die Luft erheben würde, so wäre dies das Ende unserer Naturphilosophie. Unsere Prinzipien würden versagen, und wir würden aufhören, die Regeln der Natur aufgrund unserer Beobachtungen zu untersuchen.»

Daß diese «Regeln der Natur» bzw. die «Naturgesetze», wie wir es heute nennen würden, zu jeder Zeit Ursache aller Veränderungen gewesen sein müssen, war für Huttons und Lamarcks Kollegen nicht so selbstverständlich. Für Georges Cuvier (1769–1802) beispielsweise, der 1795 (also kurz nach Lamarcks Berufung auf den Lehrstuhl für Zoologie und im selben Jahre, in dem Huttons Werk erstmals publiziert wurde) seine Berufung auf den Lehrstuhl für Vergleichende Anatomie am College de France erhielt, hatten Fossilien eine andere Bedeutung. Eines Tages brachten ihm Arbeiter Mastodonknochen aus einer Kiesgrube in einer geologischen Formation im Pariser Becken. Sofort erkannte Cuvier, daß der betreffende Urwelt-Elefant einer Rasse angehört haben mußte, die weder mit dem heutigen afrikanischen noch mit dem heutigen asiatischen (indischen) Elefanten zu tun hatte. Zusammen mit den Überresten dieses riesenhaften Säugetieres kamen Gebeine von Flußpferden, Nashörnern und Tapiren zum Vorschein – von Tierarten also, die es in Frankreich schon lange nicht mehr gab, die aber noch heute im tropischen Afrika und Asien (die Tapire in Südamerika) heimisch sind.

Als Cuvier ein paar Jahre später Säugetierskelette rekonstruierte, die in einer Gipsgrube am Montmartre geborgen worden waren (sie stammten mithin aus einer anderen geologischen Schicht, wenn auch aus demselben geographischen Raum wie die Tierüberreste zuvor), fand er, daß diese ganz

anders waren als die aller anderen bekannten Tierarten der heutigen Welt. Weil die Gipsschicht älter war als die Kiesformation, mußten diese ausgestorbenen Tierarten einer noch früheren Epoche angehört haben. Und schließlich stieß Cuvier am Rande des Pariser Beckens auf die wahrhaft bizarren Skelette von Dinosauriern, die dort in das Felsgestein eingeschlossen waren. Mit diesem Belegmaterial konnte er vier Tier-«Dynastien» nachweisen, die einst im Raum von Paris gelebt hatten: Die Generation der Dinosaurier, die der ausgestorbenen Säugetiere aus der Gipsschicht, die Mastodon-«Dynastie» und die auch heute noch im Raum Paris lebenden Landtiere.

Cuvier war ein gläubiger Mensch. So tat er sich mit der Tatsache schwer, daß die älteren Formen, die er nachgewiesen hatte, offenkundig ausgestorben waren. Denn es fiel ihm nicht leicht, dies mit der Lehre der Kirche in Einklang zu bringen. Mumifizierte Pflanzen und Tiere aus altägyptischen Gräbern, die er untersucht hatte, hatten sich nicht von heute noch lebenden Exemplaren der betreffenden Gattungen unterschieden. Da er aber von der überkommenen Zeitvorstellung ausging, wonach Ägypten schon kurz nach der Welterschöpfung als Supermacht existierte, sah er keinen Grund für die Annahme, daß sich die Ur-Organismen, die Gott erschaffen hatte, je wirklich verändert hatten, wenn es nach dem Auszug der Israeliten aus Ägypten kein Jota einer Veränderung gegeben hatte. Daher mußten die fossilen Lebewesen aus dem Pariser Becken vor den Ereignissen existiert haben, die das biblische Buch *Genesis* schildert, und sie mußten Opfer von Naturkatastrophen gewesen sein, welche von den Naturgesetzen ausgenommen waren, die heute für Gottes Schöpfung gelten. Nach Cuviers Vorstellungen waren diese Veränderungen von solcher Gewalt, «daß der Faden des Wirkens der Natur durch sie zerrissen wurde, daß die natürlichen Vorgänge auf eine andere Bahn gerieten und daß keine der Triebkräfte, die heute für die Natur gelten, für diese Werke ausgereicht haben könnten, die sie in der Urzeit vollbrachte.» Diese Schule der Naturphilosophie bezeichnete man schließlich als Kataklysmentheorie oder als Katastrophismus.

Der Biologendebatte zwischen Katastrophisten und Aktualisten entsprach bei den Geologen eine Diskussion zwischen «Neptunisten» und «Vulkanisten». Die «Neptunisten» postulierten eine Katastrophe – die biblische Sintflut –, um den Ursprung der Gesteine zu erklären. Die «Vulkanisten» dagegen hatten beobachtet, daß zumindest eine Art von Felsgestein vulkanischen Ursprungs sein mußte. Als Anhänger Huttons gingen sie von noch immer weiterwirkenden, normalen Prozessen aus, um das Entstehen geologischer Formationen zu erklären.

Die Sintfluttheorie paßt scheinbar gut zu einer allen Alpenbewohnern nur allzu vertrauten Beobachtung. Wandern ist ein schweizerischer Nationalsport. Eines Tages, als ich mit meiner Familie am Mont Vendôme in Südfrankreich über die Baumgrenze hinauffuhr, wurde mir nachhaltig zu Bewußtsein gebracht, daß Kinder, vor allem wenn sie noch nicht über ein bestimmtes Alter hinaus sind, nicht immer die Begeisterung ihrer bergwandernden El-

tern teilen. Heiß brannte die Sonne, das Gelände war kahl, und mein neun Jahre alter Sohn verlegte sich auf einen Sitzstreik. Da kam mir die Idee, ihn zur Schatzsuche zu animieren. Für jede fossile Muschel, die er fand, sollte Peter einen Rappen erhalten, aber zehn Rappen, wenn er einen *Ammoniten* entdeckte, einen jener schön geformten urzeitlichen Verwandten des mit Kammern versehenen Nautilus. Durch die Aussicht auf das Geld beflügelt, leerte der unternehmungslustige junge Mann alsbald meine Taschen, denn die Kalksteinformationen der Provence sind voll von Meeresfossilien.

Die Überreste von Seemuscheln deuten klar auf einen ozeanischen Ursprung hin. Sie hatten daher als Kronzeugen der Sintflut-These herhalten müssen, seit im siebzehnten Jahrhundert der Geistliche und dilettierende Naturforscher Thomas Burnet behauptet hatte, als Gott in seinem Zorn die Erdkruste gespalten und die «zentralen Wasser» ans Tageslicht gelassen habe, um die unbußfertige Menschheit zu strafen, hätten sich aus den «chaotischen Ablagerungen» der großen Flut sehr rasch fossile Muscheln und geschichtete Felsformationen abgesetzt. Für viele Naturforscher des achtzehnten Jahrhunderts blieben dem Meer entstammende Fossilien an so ungewöhnlichen Plätzen wie den Alpen eine dramatische Bestätigung der biblischen Sintflutgeschichte. Einer der beredtesten Vorkämpfer dieser Katastrophentheorie war John Woodward, während der ersten Jahrzehnte des achtzehnten Jahrhunderts Professor für Naturgeschichte in Oxford. Seine eindrucksvolle Sammlung von Fossilien aus englischen Fundstätten enthielt, so erklärte er, echte Überbleibsel der Flut Noahs. 1726 erreichte die Narretei ihren Gipfel. Damals teilte der Schweizer Gelehrte Johann Jacob Scheuchzer (1672–1733), ein Schweizer Freund und überzeugter Anhänger Woodwards, der Königlichen Gesellschaft in London aufgeregt mit, er habe ein «betrübtcs Beingcrüst von einem armen Sünder» gefunden, «so in der Sintfluth ertrunken». Sein *Andrias scheuchzeri* (etwa: «Scheuchzermann»), den man auch als *Homo diluvii testis* («Zeitzeugen der Sintflut») bezeichnete, schien von ungefähr derselben Statur gewesen zu sein wie sein Entdecker. Jedenfalls maß er 58 1/2 Pariser Zoll. In Wahrheit aber handelte es sich, wie Cuvier herausfand, um die Überreste eines Riesensalamanders.

Abraham Gottlob Werner (1749/1750–1817), ein Mineralogieprofessor aus Freiberg in Sachsen, ein Zeitgenosse Cuviers und Lamarcks, vertrat eine Fluttheorie, die nicht mehr ganz der Bibel entsprach und zum Glaubensbekenntnis der «Neptunisten» wurde. Werners Überlegungen zufolge hatte es einst einen allgemeinen Ur-Ozean gegeben, in dem sich Felssteinschichten abgelagert hatten. Zunächst hätte sich, so meinte er, eine primitive Serie von Niederschlagsprodukten, u. a. von Graniten und anderen kristallinen Gesteinen, herausgebildet. Darüber hätten sich Übergangsserien von Grauwacken, Marmor und Schiefer gebildet und darauf wieder die flachliegenden Schichten von Kalkstein, Sandsteinen, Kreiden, Schiefertönen, Gips und Kohle. Über all dem hätten sich dann die Alluvialreihen von Kiesen, Sanden und Tönen abgelagert.

Zufällig war gerade diese Schichtenfolge typisch für die Umgebung von Freiberg. Professor Werner hatte nie Reisen unternommen, die ihn von der Stadt, wo er wirkte und lehrte, weit weggeführt hätten. Er glaubte einfach, die dortige Schichtenfolge sei allgemein auf dem ganzen Erdball anzutreffen. Drei Jahrzehnte lang hielt der Meister Vorlesungen, in denen er sein System immer weiter ausbaute, und seine einflußreichen Schüler trugen zur weiten Verbreitung seiner Ideen bei.

Es war der Basalt, der Werner zu Fall brachte. Auf den Anhöhen rings um Freiberg fand sich Basalt zwischen abgelagerten Sedimentschichten, so daß Werner auch ihn kategorisch für ein Gestein marinen Ursprungs erklärte. Doch Nicholas Desmaret, ein Amateur-Naturforscher aus der Auvergne in Südfrankreich, befand sich in einer besseren Umgebung, um das Phänomen zu verstehen. Er fand, daß die Basaltfelsen in seiner Nachbarschaft ebensolche Löcher wie ein Schweizer Käse hatten. Allem Anschein nach hatten Gase diese Löcher verursacht, die aus dem geschmolzenen Stein entwichen waren, der dann erkaltete und hart wurde. Und mehr noch: Der Grund unter dem Basalt wies deutliche Spuren von Hitzeeinwirkung auf – ein zusätzlicher Beweis dafür, daß dieses Gestein ursprünglich heiße Lava gewesen war. Auf der Suche nach dem Ursprung der Basaltflüsse entdeckte Desmaret einen erloschenen Vulkan – einen der vielen im Tafelland Zentralfrankreichs. Obwohl er selbst nie einen Vulkanausbruch erlebt hatte, führten ihn seine sorgfältigen Beobachtungen und seine logischen Überlegungen auf der Basis des Vergleichs mit einem ihm bekannten Naturvorgang zu der korrekten Folgerung: Basalt ist ein vulkanisches Gestein. Von nun an waren Desmarets Anhänger als «Vulkanisten» bekannt.

Werner akzeptierte die Wahrheit nie, doch als einer seiner Schüler, Jean François D'Aubuisson de Voisin, 1803 die «neptunistischen» Thesen seines sächsischen Lehrmeisters in Frankreich einführen wollte, schlug man ihm vor, in die Auvergne zu kommen und sich dort selbst umzusehen. D'Aubuisson kam und war tief getroffen durch das, was er sah. Ein Jahr später trug der mutige Wernerianer dem College de France seinen Widerruf vor:

Die Tatsachen, die ich sah, sprachen eine zu klare Sprache, als daß man sie mißverstehen könnte. Die Wahrheit enthüllte sich zu klar vor meinen Augen, so daß ich entweder das Zeugnis meiner Sinne zurückweisen und meine Augen vor der Wahrheit verschließen oder gegen mein Gewissen handeln muß, wenn ich dies nicht unverzüglich bekanntgebe. Es kann gar keine Frage sein, daß in der Auvergne Basalte vulkanischen Ursprungs vorkommen.

Im Lauf der sich anschließenden Jahrzehnte des neunzehnten Jahrhunderts, die durch ein immer stärkeres Interesse an naturgeschichtlichen Fakten gekennzeichnet waren, gewann der Aktualismus die Oberhand über die Katastrophentheorien. Der Vorkämpfer der neuen Lehre war Charles Lyell (1797–1875).

Lyell wurde in einem herrschaftlichen Hause geboren. Sein Vater hatte große Pläne mit ihm. Im Alter von 15 Jahren wurde er zum Mitglied der Linné-Gesellschaft ernannt und ging als *gentleman commoner* (als privilegierter Student, der getrennt von den ärmeren Gelehrten lebte) nach Oxford. Hier lehrte William Buckland (1784–1856), ein britischer Geistlicher und Geologe (er war Dekan von Westminster und Geologieprofessor in Oxford) damals Geologie. Ein knallharter Verfechter der Sintfluttheorie, pfefferte er seine Vorlesungen mit aufregenden und faszinierenden geologischen «Beweisen» der Flut Noahs. Weil in der Bibel nichts vom Aussterben irgendwelcher Tierarten steht, nahm Buckland – ganz ähnlich wie Cuvier – an, daß fossile Skelette aus der Urzeit Überbleibsel der Fauna einer früheren Welt wären, die vor der in der Bibel beschriebenen Weltschöpfung existiert habe. Diese «Welt vor der Schöpfung» war ganz und gar zerstört worden, und die heute ablaufenden Prozesse waren ganz anders als jene, die in so weit zurückliegender Vergangenheit wirksam gewesen sein müssen...

Lyell besuchte Bucklands Geologievorlesungen. Bald schon hatte er sich mit seinem Lehrer angefreundet und wurde den damals führenden Geologen vorgestellt, die samt und sonders Katastrophisten waren. Als er dann nach Paris ging, war er mit einigen Exemplaren des von Buckland verfaßten Werkes *Reliquiae Diluvianae* (*Überreste aus der Sintflutzeit*), das 1823 veröffentlicht worden war, sowie mit einer ganzen Reihe von Empfehlungsschreiben an prominente französische Naturforscher versehen. In Frankreich lud man ihn alsbald ein, an einer geologischen Exkursion mit dem vergleichsweise unbekannten Louis Constant Prevost teilzunehmen – ein Ereignis, das sein Denken in ganz andere Bahnen lenken sollte. Prevost war Schüler des Aktualisten Lamarck. Wie vor ihm Cuvier hatte er die Schichten des Pariser Beckens untersucht, bei denen es sich um wechselweise abgelagerte Süß- und Salzwassersedimente handelte, die durch den Wechsel von Eindringen und Rückzug des Meeres entstanden sein mußten. Doch während der Katastrophist Cuvier für das Verhalten des Meeres unbekannte Ursachen von katastrophalem Ausmaß verantwortlich machte, ging Prevost davon aus, daß es ganz gewöhnliche geologische Prozesse waren, auf die die Bildung dieser Schichten zurückging. Alles mußte sich ganz allmählich abgespielt haben. Das Pariser Becken war ein Meeresarm gewesen, eine Bucht. Dann war es, vom Meer abgeschnitten, zum Binnensee geworden, danach wieder eine Meeresbucht, abermals ein See und schließlich wieder eine Bucht. Dramatisch war aus dieser Sicht nur das Ausmaß, die Größenordnung der Veränderungen, die allerdings dadurch zustande gekommen waren, daß sich ganz gewöhnliche Prozesse über einen langen Zeitraum hinweg summierten.

Die Exkursion mit Prevost, bei der anstehendes Felsgestein im Walde von Fontainebleau untersucht werden sollte (der innerhalb des Beckens liegt), machte aus dem Katastrophisten Lyell einen überzeugten Aktualisten. Er wandte sich von den Theorien seines Lehrers Buckland ab und begann, auf eigene Faust den Analogien zwischen Prozessen, die noch heute andauern, und solchen, die einst zur Bildung früher geologischer Formationen

geführt hatten, nachzugehen. Dazu brauchte er sich nicht weit umzutun. Auf dem Gut seines Vaters in Kinnordy in Schottland befand sich ein See, der Loch Bakie. Man hatte ihn trockengelegt, um an die Mergelvorkommen des Seebodens heranzukommen. Sie bestanden aus einer Mischung von Ton und kohlensaurem Kalk, die man verwendete, um saure Böden zu neutralisieren, so daß sie sich für landschaftliche Anbauzwecke eigneten. Er verglich diesen rezenten Kalkstein des Loch Bakie mit dem urzeitlichen Kalkstein des Pariser Beckens und stellte fest: Beide waren identisch. Cuvier war der Ansicht gewesen, urzeitliches Felsgestein habe in heutigen Seen kein Gegenstück. Lyell hatte es dagegen sozusagen in seinem Hinterhof entdeckt.

Nun ganz und gar davon überzeugt, daß heutige geologische Prozesse mit denen einer weit zurückliegenden Vergangenheit identisch und für die Bildung der geologischen Formationen jedes Zeitalters verantwortlich sind, warf sich Lyell mit aller Begeisterung eines Bekehrten auf den Aktualismus. Hutton hatte postuliert, daß geologische Vorgänge in Vergangenheit und Gegenwart denselben physikalischen Gesetzen unterworfen waren, hatte allerdings keineswegs behauptet, daß die Prozesse selbst identisch seien. Er war im Gegenteil der Ansicht, Schottland hätte schon lange ins Meer gespült sein müssen, wenn es dort zu allen Zeiten so viel Bodenerosion gegeben hätte wie gerade in der Gegenwart. Als übereifriger «Konvertit» aber fügte nun Lyell Huttons Konzept von der Gleichheit der physikalischen Gesetze die Forderung hinzu, daß die Prozesse, die schon in der Vergangenheit wirkten, auch heute noch wirksam sein müßten, und daß es im Lauf der Zeit auch eine Gleichförmigkeit von «Status» und «Rate» gab.

Zu den geologischen Prozessen gehören die Sedimentation, wie beispielsweise die Ablagerung von Kalziumkarbonat an Seeböden, woraus die Kalksteine im Loch Bakie und im Pariser Becken entstanden, aber auch weniger sanft ablaufende Ereignisse wie Erdbeben, Erdbeben und Vulkanausbrüche. Die Bezeichnung «Status» bezieht sich auf Bedingungen wie die Verteilung unterirdischer Kräfte, die Gebirge aufalten, die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre oder das globale Klima. Unter «Rate» verstehen wir das Ausmaß eines Ereignisses und den Grad der Energie, den es benötigt. Nach Lyells Auffassung waren geologische Veränderungen während der gesamten Erdgeschichte eine Sache nicht enden wollender Detailveränderungen durch Vorgänge, die sich auch heute noch in der gleichen Größenordnung auf unserem Planeten abspielen, dessen innere Kräfte, dessen Chemie und dessen Klima von Anfang an gleich waren.

Doch Lyells Ideen wurden sofort auf die Probe gestellt. Louis Agassiz (1807–1873), ein junger schweizerischer Kollege, der gerade zu der Zeit wissenschaftlich tätig war, als Lyell sich zum Aktualismus «bekehrte», fand Beweise dafür, daß Zentraleuropa und die Hälfte Nordamerikas in erdgeschichtlich nicht allzu ferner Vergangenheit von Eiskappen bedeckt waren. Buckland war natürlich vom Gedanken einer weltweiten Frostkatastrophe begeistert und besuchte seinen ehemaligen Schüler Lyell in Kinnordy, um ihn

auf «eine schöne Anhäufung von Moränen, weniger als zwei Meilen vom Haus seines Vater entfernt», hinzuweisen. Lyell wußte, was Moränen sind. Er war mit rezenten Moränen vertraut, jenen Hügeln aus von Gletschern aufgehäuften Gesteinstrümmern, die sich am Ende von Gletscherzungen bilden. Also mußte auch er zugeben, daß es einst auf dem europäischen Kontinent Gletscher gegeben hatte, wo sich im heutigen Klima kein permanentes Eis mehr bilden kann. Doch nach wie vor ein streitbarer Gegner der Katastrophentheorie, suchte er die Bedeutung und das Ausmaß der Eiszeit herabzusetzen, indem er von regionalen Klimaverschiebungen sprach, die durch «örtliche Veränderungen in der äußeren Konfiguration unseres Planeten» verursacht worden seien und sich trotz allem mit seiner Aktualismus-Lehre vereinbaren ließen.

Ja, da er sich beim Gedanken an regelrechte Revolutionen im Lauf der Erdgeschichte ganz und gar nicht wohlfühlte, war er anfangs auch mißtrauisch gegenüber den «Transformationen», die Lamarck für die Geschichte der Lebensformen auf Erden annahm. Noch 1832 schrieb er in der ersten Auflage seiner *Principles of Geology*:

Artveränderungen, ob sie von Natur aus stattfinden oder durch das Eingreifen eines Züchters oder Gärtners, sind noch nie so weit gegangen, daß zwei verschiedene Rassen entstehen, die so voneinander verschieden sind, daß sie bei Kreuzung keine Nachkommen oder allenfalls unfruchtbare Mischlinge erzeugen.

Und doch beunruhigten Lyell die Unterschiede zwischen fossilen und modernen Arten, und er war zweifellos erleichtert, in Giovanni Broccchis Werk über fossile Muscheln in alten Formationen der italienischen Küstengebiete zu lesen, daß dieser Naturforscher verblüffende Ähnlichkeiten zwischen fossilen und modernen Arten der Mittelmeerfauna entdeckt hatte. Um selbst derartige Übereinstimmungen nachzuweisen, trat er 1824 eine Reise nach Kalabrien an. Unterwegs machte er in Turin Station, um eine Sammlung fossiler Muscheln von den nahen Superga-Höhen zu besichtigen. Zu seiner Überraschung und Enttäuschung machte ihn der Kurator des Museums, in dem die Sammlung untergebracht war, darauf aufmerksam, daß sich die Turiner Fossilien jedenfalls sehr erheblich von den rezenten Muscheln unterschieden, wie sie heute an Italiens Küsten leben. Beunruhigter als je zuvor reiste Lyell nach Kalabrien und Sizilien weiter, um sich eine eigene Fossilien-sammlung anzulegen.

Damals steckte die Datierung der Fossilien noch in ihren Kinderschuhen. Cuvier hatte auf der Basis des Gesetzes vom Übereinander der Schichten eine *relative* (d. h.: aufeinander bezogene) Zeitstellung der vier Tier-«Dynastien» im Pariser Becken nachweisen können – mit anderen Worten: Er konnte immerhin bestimmen, welche dieser «Dynastien» jünger (bzw. älter) war als die anderen. Jede Sedimentschicht lag auf einer anderen. Mithin mußte die

obere Schicht jeweils jünger sein als die darunterliegende. Bei der Untersuchung der intakten Schichtenfolge im Pariser Becken konnte er ganz problemlos nachweisen, daß die in einer höheren Schicht gefundenen Mastodon-Überreste jünger sein mußten als die Überreste anderer ausgestorbener Säugetiere aus tiefer gelegenen Sedimenten – und daß schließlich die Dinosaurier-Überreste (aus dem untersten Stratum der Schichtenfolge) die ältesten hier vorgefundenen Tierknochen sein mußten.

Dies war möglich, weil solche Becken wie die, in denen Paris und London liegen, sich über mächtigen kontinuierlichen Formationen erstrecken, deren Schichten über weite Distanzen hinweg zusammenhängen. Anderswo dagegen wurden die Sedimente unterschiedlich stark gestört. Stellenweise wurde eine der Schichten (in der Regel die oberste) durch Erosion wieder abgetragen. Daher läßt sich nicht mit Sicherheit sagen, ob beispielsweise die zwölfte Schicht unter dem Gipfel einer bestimmten Felsformation ebenso alt ist wie die zwölfte Schicht unter dem Gipfel einer anderen. Außerdem gibt es keine Garantie, daß Felsgesteine gleichen Alters auch gleichen Typs sind. Mag sein, daß sie einst an einer Stelle, wo sich ein Seeboden befand, Kalksteinablagerungen absetzten, während sich zur selben Zeit anderswo in einer Überflutungsebene Schiefer bildete. Weiterhin führen geologische Prozesse zur Verwerfung von Schichten, falten sie in eine Schräglage, lassen sie bersten, schieben sie übereinander und verwandeln schließlich ihre Reihenfolge sogar in deren Gegenteil, so daß die Schichten dann «auf dem Kopf» stehen. Derart gestörte Schichten gleichen dann eher einem Manuskript, dessen lose Blätter in einen Sturm geraten sind, als einem Buch, dessen säuberlich durchpaginierte Seiten vom vorderen bis zum hinteren Einbanddeckel in der richtigen Reihenfolge abgeheftet sind und einen sinnvollen, leicht erkennbaren Zusammenhang ergeben.

Allerdings läßt sich auch ein vom Winde durcheinandergebrachtes Manuskript relativ leicht wieder ordnen – dann nämlich, wenn seine einzelnen Seiten mit den nötigen Seitenzahlen versehen sind. Ein Vermessungssingenieur namens William Smith fand heraus, daß man Fossilien als «Seitenzahlen» verwenden kann, um die richtige chronologische Position einer Schicht selbst dann festzulegen, wenn die Sedimente, in die sie eingebettet ist, durcheinandergekommen sind. Als junger Mann, der gerade erst seine Ausbildung beendet hatte, war er eingestellt worden, um die Vermessungen für ein Netz von Binnenwasserstraßen durchzuführen, die die britische Regierung für den Kohlentransport anzulegen beabsichtigte. Er stieg 1794 in das Somerset-Kanal-Projekt ein, vermaß während der nächstfolgenden sechs Jahre jeden Abschnitt des Kanalverlaufs und überwachte schließlich den Bau.

Beiderseits des neuen Kanalbettes wurden anstehende Felsformationen freigelegt, doch keine zwei davon wiesen genau die gleiche Reihenfolge auf. Kalkgesteine, Schiefer, Sandsteine, Kreiden und Tone schienen keine so charakteristischen Züge zu besitzen, als daß man sie leicht hätte identifizieren können. Doch nachdem Smith sich sechs Jahre lang immer intensiver mit der Materie vertraut gemacht hatte, wurde ihm klar, daß jede einzelne Schicht

ihre für sie besonders charakteristischen Fossilien enthielt und daß die Faunasequenzen (d. h. die Abfolgen der in den Schichten eingeschlossenen schichttypischen Tier-Überreste) stets die gleichen waren. Im Erkennen derartiger Fossilien-Abfolgen wurde Smith so erfahren, daß er einem Geistlichen namens Benjamin Richardson, der ein Hobby-Fossiliensammler war, von jedem Fossil aus dem Durcheinander seiner Privatsammlung genau sagen konnte, woher es stammte. Außerdem konnte er dem geistlichen Herrn voraussagen, welche Arten von Fossilien er aller Voraussicht nach auf den verschiedenen Anhöhen der Region finden werde.

Smiths geologische Karte, welche die Strata (Schichten) von England und Wales zeigte, wurde 1815 veröffentlicht. Ein Jahr darauf folgte seine Publikation *Strata Identified by Organised Fossils* (*Durch Fossiliensystematik identifizierte Schichten*). Damit war die Wissenschaft der *Stratigraphie* (wörtlich: «Schichtenbeschreibung», «Schichtenkunde») geboren, auf der sich die geologische Chronologie aufbauen sollte. Es bedurfte nur noch eines Klassifikationsschemas – und Lyell war im Begriff, genau dieses einzuführen.

Lyell war alles andere als ein Experte für fossile Muscheln. Dies war vielmehr ein Pariser Amateursammler namens Gerard Deshayes. Dieser exzentrische Franzose wirtschaftete durch seine Leidenschaft für Fossilien zwar seine Arztpraxis zugrunde, doch hatte er sich einen guten Ruf als Kenner erworben, der imstande war, das Alter von Muscheln zu bestimmen. Lamarcks Klassifikationsschema beruhte auf den Übereinstimmungen bzw. Ähnlichkeiten zwischen ausgestorbenen und noch lebenden Arten. Smiths Chronologie fußte auf seiner empirischen Kenntnis der Reihenfolge, in der die einzelnen Arten ausgestorben waren. Deshayes, der mit rezenten Fossilien arbeitete als Lamarck oder auch Smith, unterschied Specimina höheren Alters durch den Grad der Ähnlichkeit ganzer Muschel-«Assemblagen» mit heutigen Muschel-«Vergesellschaftungen». Muschel-«Assemblagen» bzw. Muschel-«Vergesellschaftungen» sind Muschelpopulationen aus unterschiedlichen, aber zur gleichen Zeit lebenden Arten. Deshayes hatte beobachtet, daß sich die artenmäßige Zusammensetzung derartiger «Vergesellschaftungen» im Laufe der Zeit ändert – einige Arten sterben aus, andere kommen hinzu. Daher die chronokritische (für den Zeitansatz relevante) Bedeutung derartiger «Vergesellschaftungen». Je mehr Arten innerhalb einer fossilen Muschel-«Vergesellschaftung» noch in einer rezenten Assemblage vertreten waren, desto jünger mußte die fossile Assemblage sein. Fossile Assemblagen, die weniger noch existierende Arten enthielten, mußten demnach entsprechend älter sein.

Nach Paris zurückgekehrt, sandte Lyell dem bankrotten Arzt 100 Pfund Sterling. Dafür sollte Deshayes die Muscheln untersuchen, die er, Lyell, aus Turin, Kalabrien und Sizilien mitgebracht hatte. Ein Jahr später sandte Deshayes seinen Bericht: Brocchi hatte recht gehabt. Die meisten fossilen Arten aus Kalabrien und Sizilien gibt es noch heute. Die Assemblage glich praktisch einer Sammlung von Muscheln, wie man sie dort noch heute am Strand

findet. Allem Anschein nach waren diese Fossilien sehr jung. Doch auch der Museumsdirektor aus Turin hatte recht. Von den Muscheln aus den Superga-Höhen glichen ganze 20 % noch lebenden Formen. Bei den übrigen 80 % dagegen handelte es sich klar um ausgestorbene Arten. Deshayes hatte auch noch eine französische Muschelsammlung aus Bordeaux zum Vergleich herangezogen. All diese Kollektionen, so urteilte er, gehörten einer fossilen Gruppe mittleren Alters an. In der Assemblage aus den Becken von Paris und London hatte Deshayes schließlich aus einer Gesamtzahl von 1112 Stück nur ganze 38 Exemplare moderner Arten aussondern können. Dies entspricht einem Anteil von 3,5 %.

Deshayes' Bericht veranlaßte Lyell, die allgemeine These zu formulieren, die geologische Chronologie ließe sich anhand der Anteile noch existierender Arten in einer fossilen Assemblage festlegen. Er nannte die älteste von Deshayes identifizierte Gruppe Eozän («Eos» war die altgriechische Göttin der Morgenröte) und meinte damit die «Morgendämmerung» der geologischen Jetztzeit. Deshayes' mittlere Gruppe bezeichnete er als Miozän, um zum Ausdruck zu bringen, daß die dort angetroffenen Fossilien «weniger rezent» seien. Deshayes' jüngste Gruppe aber nannte er Pliozän (frei übersetzt: «rezenten»).

Diese drei von Lyell eingeführten Namen sind noch immer in Gebrauch. Doch wendet man sie heute nicht mehr auf die gleichen Zeiträume an wie einst, da weitere Untersuchungen fossiler Assemblagen größere Differenzierungen nötig machten. Der «Morgendämmerung» des Eozän geht nun das Paläozän als noch viel weiter zurückliegende Frühphase der Jetztzeit voraus. An das Ende des Eozäns schließt sich nun das Oligozän an, mit dessen Bezeichnung zum Ausdruck gebracht werden soll, daß die Fauna immerhin schon ein wenig neuartiger ist. Schließlich folgen das noch nicht so rezente Miozän und das rezentere Pliozän, gefolgt von zwei weiteren Gruppen – dem Pleistozän (mit den meisten rezenten Arten) und dem Holozän, der voll rezenten Epoche, in der wir heute noch leben.

Nach dieser erweiterten Nomenklatur liegt die Eiszeit im Pleistozän, einer der Jetztzeit schon sehr nahen Epoche. Auch Cuviers Knochen-«Betten» im Pariser Becken lassen sich in diese Systematik einordnen. Die Mastodonfauna existierte während der Eiszeit im Pleistozän, während die ausgestorbenen Arten aus dem Steinbruch am Montmartre dem viel früheren Oligozän angehörten. Doch die Dinosaurierfauna ist älter. Älter als jede der von Lyell benannten Epochen.

Lyells geologische Epocheneinteilung konnte sich auf den Anteil der noch lebenden Arten an fossilen Faunen stützen, weil all die Sammlungen, die Deshayes untersucht hatte, aus Schichten des Känozoikums stammten – der Ära der rezenten Lebensformen, die sich vom Untergang der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren bis zur Gegenwart erstreckt. Im Gegensatz dazu enthielten William Smith's Sammlungen aus dem Somersetkanal praktisch keine noch heute lebenden Arten. Sie müssen mithin älter sein als selbst die «fernliegend rezente» Epoche des Paläozäns. Das Gesetz der einander über-

lagernden Schichten bestätigt diese Folgerung, denn die Strata (Schichten, Ablagerungen, Sedimente), die im Somersetkanal zum Vorschein kamen, liegen unter den Paläozän-Formationen des Londoner Beckens. Dennoch bestand für Smith noch immer genügend Ähnlichkeit zwischen den ausgestorbenen und den lebenden Arten, um Lamarcks Klassifikation der Fossilien-Identifikation anzuwenden. Um diese Zwischenzeit der Lebensformen auf der Erde zu charakterisieren, verwendet man den Terminus Mesozoikum (etwa: «Mittelalter der Lebensformen»). Fossilien aus noch älteren Felsgesteinen wiesen sehr wenig Ähnlichkeit mit heutigen Formen auf. Die Zeitspanne, in der sie lebten, bezeichnet man schließlich als Paläozoikum – als die Ära der «alten Lebensformen».

Während die Geologen und Paläontologen mehr und mehr Fossilien ausgruben und klassifizierten, untergliederten die Systematiker die drei Hauptären (Paläozoikum, Mesozoikum und Känozoikum) in eine ganze Reihe von Stufen und Unterperioden. Die erste zeitliche Unterordnung innerhalb der Ären nennt man Perioden, die wiederum in Epochen aufgeteilt sind, wie z.B. jene, welche die Jetztzeit umfaßt. Weil eine echte Flut von Benennungen mit der Nomenklatur in Einklang gebracht werden mußte, die bereits im Gebrauch war, bevor sich dieses moderne Schema herausbildete, wurden unvermeidlicherweise manche der früheren Namen aus ihrem ursprünglichen Zusammenhang gelöst. Beispielsweise nennt man die erste Periode des Känozoikums (die das Paläozän, Eozän, Oligozän, Miozän und Pliozän umfaßt) Tertiär, obwohl die Begriffe «Primär» und «Sekundär» längst aus der Fachsprache der Geologen entfernt worden sind. Die Endphase des Mesozoikums bezeichnet man als «Kreidezeit» (oder auch einfach nur «Kreide»), dies nach der Kreideformation beiderseits des englischen Kanals, welche die für diese Phase charakteristischen Fossil-«Vergesellschaftungen» (Assemblagen) enthält (vgl. dazu die geologische Zeittafel S. 262).

Die Epochen wiederum zerlegte man in einzelne Stufen. Die Endphase der Kreidezeit wurde zur Maastrichtstufe (nach der holländischen Stadt Maastricht, wo das erste Fossil einer Riesenechse gefunden worden war). Die erste Stufe des Paläozän wiederum nannte man Danium (nach dem Landesnamen Dänemark). Die Dinosaurier starben am Ende der Maastrichtstufe aus, bevor das Danium begann. Die kleinste dieser Unterteilungen nennt man Fossilienzone. Dieser Terminus bezieht sich auf die Lebensdauer einer typischen Fossilien-Assemblage. Es gibt in jeder Stufe eine ganze Menge von ihnen.

Als ich während der fünfziger Jahre in Los Angeles studierte – mehr als 100 Jahre, nachdem Lyell seine formalisierte Chronologie ausgearbeitet hatte –, präsentierte man mir mein Arbeitsgebiet wie einen säuberlich gepflegten Garten. Der Aktualismus hatte sich durchgesetzt. Tatsächlich war der Katastrophismus so eng mit den christlichen Dogmen verknüpft gewesen, daß er in naturwissenschaftlichen Kreisen ganz und gar in Verruf geraten war. Sein letztes Überbleibsel im zwanzigsten Jahrhundert ist der Kreationismus (der

in Amerika wissenschaftliche Geltung beanspruchende Glaube an die biblische Schöpfungslehre), dessen Anhänger noch immer fossile Lebensformen mit der biblischen Sintflut in Verbindung bringen. Naturwissenschaftler dagegen sahen schon in der bloßen Vorstellung, ein aus dem Rahmen fallendes, katastrophales Ereignis für ein Phänomen der Erdgeschichte verantwortlich zu machen, fast so etwas wie eine Beschwörung überirdischer Mächte. Mein von mir verehrter und geliebter Lehrer, Ed Spiecker von der Staatsuniversität von Ohio, ging sogar so weit zu fordern, das Wort «Revolution» solle ganz und gar aus allen geologischen Lehrbüchern gestrichen werden.

Das Prinzip, das man uns damals mit aller Gewalt beibrachte, war das der Evolution – die sanfte Evolution in der Geologie wie in der Biologie. Schließlich leitete uns nicht nur Lyells Lehre von der Gleichförmigkeit der Prozesse, des Status und der Raten, sondern wir gingen auch von einer genauestens untergliederten, und doch fast unvorstellbar langen Abfolge der Erdzeitalter seit dem Werden unseres Erdballes vor mehr als 4,5 Milliarden Jahren aus. Abgesehen von diesen Voraussetzungen der Gleichförmigkeit und der zur Verfügung stehenden Zeit gab es kein Phänomen, so extrem es auch war, das nicht erklärt werden konnte. Die gewöhnlichen Alltagsereignisse, die wir Tag für Tag mit eigenen Augen wahrnahmen, hatten – über unermessliche Zeiträume hinweg – ganz allmählich das Buch der Erdgeschichte geschrieben, das dann schließlich aus den Befunden der Geologie zu uns sprach.

In diesem Sinne von Lyell-Anhängern ausgebildet, war ich überrascht, als ich 1954 meine erste offizielle Anstellung als Geologe erhielt. Ich arbeitete im Auftrag der Forschungsabteilung des Shell-Konzerns in Texas an einem Projekt, bei dem es um die Untersuchung heutiger Sedimente an Flüssen und Stränden ging. Oft ging ich damals zu einer Sandbank am Rio Brazos nahe bei Houston, um Material zu sammeln. Meist ist der Brazos eher ein Rinnsal als ein wirklicher Fluß. Seine Wassermenge reicht kaum hin, um etwas anderes zu transportieren als feinen Lehm. Und doch türmen sich an seinen Ufern große Haufen von schweren, groben Sanden. Eines Tages gab es eine Frühjahrsüberschwemmung. Als ich wieder zu meinem üblichen Platz kam, um Proben zu entnehmen, konnte ich die Stelle kaum wiedererkennen. Die reißende Frühjahrsflut hatte am Ufer eine neue, mehrere Meter hohe Sandablagerung aufgetürmt. Sofort wurde mir klar: Es sind nicht immer nur die alltäglichen Kräfte des Wassers, welche zur Ablagerung von Sedimenten führen, sondern auch die Fluten eines Frühjahrsregens haben ihren Anteil an der Sedimentation.

Damals untersuchte mein Freund Robert Ginsburg die Korallenriffe vor Florida. Hinter diesen Riffen mit den Kolonien derzeit lebender Korallen gab es flache Stellen voller Trümmer zerbrochener Riffe, und doch waren die täglichen Gezeitenwechsel viel zu schwach, um die mächtigen Gipfel abgestorbener Korallenriffe von der Stelle zu bewegen. Das Rätsel löste sich, als im September 1960 der Hurrikan «Donna» über dem Seegebiet vor Florida

wütete. «Donna» war der gewaltigste Sturm in der dortigen Region seit einem Vierteljahrhundert. Seine Geschwindigkeit erreichte 300 Stundenkilometer, und die Wogen gingen bis zu dreieinhalb Meter hoch – fast zehnmal so hoch wie normalerweise. Niemand war zur Stelle, um mitten im Unwetter die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers zu messen, doch sie muß hoch genug gewesen sein, um mächtige Geröllbrocken zu versetzen. Hinter dem Riff türmte sich eine neue Schicht von Korallenschutt auf. Vielleicht, so dachte ich, meinte Lyell nicht nur das Alltagsgeschehen in der Natur, sondern auch gelegentliche Katastrophen, wenn er von «heute wirksamen Prozessen» sprach.

Mein nächster Forschungsauftrag für Shell bestand in der Untersuchung der ölführenden Sande von Ventura in Kalifornien. Diese Sande enthielten die winzigen Schalen von Weichtieren, die gewöhnlich auf dem als «Abyssos» bezeichneten Teil des Tiefseebodens heimisch sind. Man hat zwar die Ansicht geäußert, daß die Sande von Ventura einst im «Abyssos»-Bereich abgelagert und später durch Hebung des Meeresbodens zu einem Teil des Kontinents wurden, doch diesen Gedanken wieder verworfen, denn alle Experten wußten, daß Tiefseesedimente aus feinen Tönen und Schlämmen bestehen. Grobe Zerfallsprodukte kontinentalen Ursprungs – die Sande und Kiese, die durch Erosion von Festlandsgesteinen entstehen – sind zu schwer, um von Wogen und Strömungen zu den abgelegenen Tiefen außerhalb des Festlandsockels transportiert zu werden. Es treten jedoch, wenn auch sehr selten, Unterwasserlawinen auf, die mächtige Strömungen auslösen. Mit Geschwindigkeiten von 50–100 Stundenkilometern und mehr rasen sie an übersteilen Hängen an der Flanke des Kontinentalschelfs (Festlandsockels) in die Tiefe und rufen so Strömungen von verheerender Gewalt hervor, die durchaus Sande und Kiese hinab in die Tiefseeregion zu transportieren vermögen. Dieser Gedanke, den Generationen von Lyell faszinierter Naturwissenschaftler einfach nicht wahrhaben wollten, wurde 1950 wieder ins Gespräch gebracht, und meine eigenen Untersuchungen bei Ventura überzeugten mich, daß in der Tat das Wirken selten auftretender, aber dann ungewöhnliche Kräfte entfaltender Prozesse in Erwägung zu ziehen ist.

Wie fehlbar Lyells Lehre ist, wenn man sie als Dogma auffaßt, ahnte ich zwar, begriff es in vollem Umfang allerdings erst, als meine Kollegen und ich unter den tiefblauen Fluten des Mittelmeeres eine Steinsalzformation entdeckten. Gewöhnlich lagert sich Salz in flachen Pfannen ab – in Untiefen, Lagunen oder Salinen, wo sich Salzlake immer mehr durch Verdunstung verdichtet, bis schließlich die Salzkristalle ausfallen. Und es gab unzweideutige Beweise, daß das Salz unter dem Mittelmeer wirklich der Überrest eines Verdunstungsvorganges war. Dieses Steinsalz hatte sich als Verdunstungsrückstand gebildet, als einst das gesamte Mittelmeer bis hinab in eine Tiefe von 5000 Metern und in einer Ausdehnung von 2,5 Millionen Quadratkilometern ausgetrocknet war. Als diese These trotz aller Beweise, die wir vorbringen konnten, mit der Begründung zurückgewiesen wurde, die Austrocknung des Mittelmeeres sei «kein noch heute wirkender Prozeß», kam mir

endlich zu Bewußtsein, daß viele meiner Fachkollegen sich in ihrem Denken gar nicht so sehr von religiösen Fundamentalisten unterschieden. Eine Theorie, so hörte sich ihre Argumentation wenigstens an, kann nichts taugen, wenn sie dem Evangelium widerspricht, das in diesem Falle Charles Lyell verkündet hatte.

Doch wie man mich auch lächerlich zu machen versuchte – es war nichts im Vergleich mit den Demütigungen, die zwei Naturforscher unseres Jahrhunderts zu erdulden hatten, die sich gegen einen orthodoxen Aktualismus aussprachen, um von ihnen beobachtete Phänomene auf ihre Weise zu erklären.

Alfred Wegener (1880–1930), der von Haus aus Meteorologe war, wurde einfach durch einen Blick auf die Weltkarte auf seine Theorie der Kontinentalverschiebung gebracht. Wie schon andere vor ihm, stellte er fest, daß der «Buckel», den die Ostküste Südamerikas bildet, ziemlich genau in die riesige Einkerbung unter dem weit vorspringenden «Bauch» der afrikanischen Westküste paßt – genau so, als ob die beiden Kontinente einst eine Einheit gebildet hätten und seitdem auseinandergedriftet wären. Außerdem gab es Ähnlichkeiten zwischen den fossilen Tierarten Südamerikas und Afrikas. An der Vorstellung festhaltend, daß die Lage der Kontinente für alle Zeiten feststand, hatten Paläontologen ehemalige «Landbrücken» vermutet, über die einst die tierischen Landbewohner Afrikas und Südamerikas hin und her gewandert seien, bis diese Brücken spurlos in den Fluten des Atlantik versanken.

Noch charakteristischer als die Ähnlichkeiten der fossilen Fauna waren die Übereinstimmungen der geologischen Formationen mehrerer Kontinente. Von Eisdecken hinterlassene Sedimente in Südamerika standen für Wegener in unmittelbarem Zusammenhang mit Gletschersedimenten in Afrika, Indien und Südastralien, so als ob alle eine gemeinsame Episode der Vergletscherung erlebt hätten.

Nach sorgfältiger Prüfung all dessen, was für seine Auffassung sprach, stellte Wegener also schließlich die These auf, daß all diese Kontinente einst gemeinsam einen Superkontinent gebildet hatten, dem er den exotischen Namen «Gondwanaland» gab, und der im antarktischen Bereich gelegen haben mußte. Wie es dazu kam, daß dieser Superkontinent zerbarst und in Teilkontinente zerfiel, die auseinanderzudriften begannen, und welche geophysischen Kräfte und Mechanismen bei dieser Kontinentaldrift wirksam waren, vermochte er selbst nicht zu sagen. Da er von Haus aus Meteorologe war, betrachteten ihn die Geophysiker als Außenseiter, zumal er es ja tatsächlich gewagt hatte, die ausgetretenen Pfade der in Nordamerika und Westeuropa vertretenen Lehrmeinung zu verlassen. Ganz sicher hatte er die Grenzen des Erlaubten überschritten. Jedenfalls schienen die Kontinente heute nicht mehr in Bewegung zu sein, so daß man irrtümlicherweise Wegener vorwerfen konnte, er vermute das Wirken eines nicht mehr aktiven Prozesses. Man erklärte seine Ideen für indiskutabel und verlachte ihn. Erst fünfzig Jahre später kam man auf seinen Gedanken der Kontinentalverschiebung (nun

sprach man von «Plattentektonik») zurück, und nun gelang endlich der Nachweis, daß die Kontinente tatsächlich seit eh und je in Bewegung waren und es noch immer sind.

Einen noch schlimmeren Verstoß gegen die reine Lehre hatte sich der amerikanische Geologe J. Harlen Bretz von der Universität Chicago erlaubt, der allen Ernstes eine gewaltige Flutkatastrophe für die Entstehung der bizarren Landschaftsformen des amerikanischen Westküsten-Hinterlandes verantwortlich machte. Er brachte Jahre damit zu, die bizarr geformte und teilweise wie blankgefeigte Landschaft zu untersuchen, und gelangte zu dem Schluß, daß eine Überschwemmung von ungeheurer Gewalt diese Formen hervorgerufen haben mußte.

Diese vermeintliche Irrlehre erwies sich erst jüngst als vollauf gerechtfertigt, als sich nämlich herausstellte, daß vor etwa zehntausend Jahren der natürliche Gerölldamm eines riesigen Gletschersees, der größer war als alle heutigen Binnenseen Nordamerikas zusammen, dem Druck der Wassermassen nicht mehr standgehalten hatte und ein Schwall von Millionen Tonnen Süßwasser mit einer Geschwindigkeit von Hunderten von Kilometern pro Stunde sich über das Plateau ergoß, das zwischen dem ehemaligen Binnensee und dem Pazifik lag. Heute ist man der Ansicht, daß sich das alles innerhalb von ganz wenigen Tagen abgespielt hat.

Im Jahre 1983 erhielt Harlen endlich die Penrose-Medaille – die höchste Auszeichnung, welche die Geologische Gesellschaft Amerikas zu vergeben hat. Doch Harlen hatte 97 Jahre alt werden müssen, bis ihm diese Ehrung widerfuhr.

Das Ärgerliche an Lyells These war, daß er nicht klar zwischen dem Unwahrscheinlichen und dem Unmöglichen unterschieden hatte. Unmöglich ist, was gegen die Naturgesetze verstößt – beispielsweise, daß ein Stein unter dem Einfluß der Schwerkraft nicht zu Boden fällt, sondern sich in die Luft erhebt. Unwahrscheinlich ist dagegen nur, was nicht sehr oft geschieht.

Wir Chinesen haben gelernt, uns in Geduld zu üben. Wir haben keine Eile, ein Unrecht zu rächen, das man uns angetan hat. Eher neigen wir dazu, eine Angelegenheit philosophisch zu betrachten und zu sagen: «Warte nur! Jetzt entgehst du vielleicht der Strafe, doch zur gegebenen Zeit werden deine Nachkommen schon für das Unrecht zahlen, das du begangen hast!» Kleine Mißgeschicke begegnen dem Menschen immer wieder, und wenn nur genug Zeit bleibt, wird vielleicht selbst den Mächtigsten ein großes Mißgeschick ereilen.

In dieser Volksweisheit spiegelt sich das statistische Gesetz des umgekehrten Verhältnisses (der inversen Korrelation) zwischen dem Ausmaß und der Häufigkeit von Naturereignissen. Kleinere Berggrutsche gibt es in der Schweiz jedes Jahr. Größere, die ganze Dörfer unter sich begraben, haben sich während der letzten paar Jahrhunderte nur ein- bis zweimal ereignet. Noch größere Geröllawinen, deren Trümmer über Dutzende von Kilometern hinweg das Land verschütteten, kamen während der letzten paar Jahrmlionen nur ganz wenige Male vor – und dies nie in historischer Zeit. Sicherlich hatte

Lyell nicht recht, wenn er behauptete: «Natürliche Prozesse haben sich nie mit einem Energieaufwand abgespielt, der sich von dem unterschied, den sie heute benötigen.»

Auch seine Behauptung, der Zustand der Erde, das Klima und eine ganze Reihe anderer Lebensbedingungen (zusammenfassend als *Status* bezeichnet), sei stets gleich gewesen, erwies sich als zu starr. Als sich die Kontinente unseres Planeten mit dicken Eispanzern bedeckten, um als Beispiel die Eiszeit anzuführen, muß der Zustand unseres Planeten (beispielsweise seine Fähigkeit, Licht und Wärme zu reflektieren und seine Position gegenüber der Sonne) ganz anders gewesen sein als zu anderen Zeiten, denn das Klima kühlte sich so dramatisch ab, daß innerhalb dreier längerer Perioden während der letzten Milliarde Jahre die Kontinente mit Eis bedeckt waren. Sicher herrschten auch nicht die gleichen Klimabedingungen wie heute, als einst das Mittelmeer völlig austrocknete. Damit aus diesem Meer ein Binnensee werden konnte, der allmählich durch Verdunstung trockengelegt wurde, hatte sich entweder der Boden der Straße von Gibraltar heben müssen, um das Mittelmeer vom Atlantik abzuschneiden, oder der allgemeine Spiegel der Ozeane muß gesunken sein.

Wenn Lyell irrte, was die Gleichförmigkeit von *Status* (Zustand) und *Rate* (Größenordnung) anging, irrte er dann aber nicht auch mit seiner Behauptung, die beteiligten Wirkkräfte und Prozesse seien stets gleich gewesen? In einem gewissen Sinne trifft auch das zu. Ein ganz gewöhnlicher Vorgang, der sich zu einer höheren Energierate emporschaukelte, könnte neuartige Prozesse in Gang gesetzt haben, die sonst vielleicht so nicht abliefen. In China kennt jeder die Erzählung von einem alten Narren namens Yukung, der so schlichten Gemütes war, daß er dachte, man könne Berge abtragen, indem man mit Hilfe eines Schubkarrens Tag für Tag Erde abfährt. Lyell hätte Yukung zugestimmt. An Bergflanken gleiten Felstrümmer zu Tale, und ganz allmählich, nach langer, langer Zeit verschwinden so Berge durch Erosion. Aber die Natur kennt nicht nur diese eine Methode. Vor 50 Millionen Jahren brachen beispielsweise im westlichen Wyoming die Ur-Rocky-Mountains zusammen. Nicht Felsbrocken für Felsbrocken, sondern das ganze Gebirge auf einmal, und in nur wenigen Stunden waren die Hochebenen im Westen des heutigen Staates weithin von den Trümmern bedeckt. Heute rasen keine Gebirgstrümmer mehr mit unvorstellbarer Wucht über irgendwelche Hochebenen. Doch während des Eozäns gab es diesen urplötzlichen Gebirgseinsturz wirklich.

Die Zeit ist ein zweischneidiges Schwert, und Lyell kannte nur die eine Schneide. Er sah völlig zutreffend, daß im Laufe der Zeit das sanfte Vorbeistreichen des Sandes selbst die mächtigsten Gebirgsmassive bis auf Seehöhe abhobelt. Was er nicht sah, war, daß im Laufe eines großen Zeitraumes auch die Wahrscheinlichkeit größer wird, daß seltene Ereignisse, daß Katastrophen eintreten. Tag für Tag werden wir mit kosmischen Staubpartikeln konfrontiert. Möglicherweise entspricht es der statistischen Erwartung, daß jedes Jahrhundert einmal eine Person von einem felsblock-

großen Partikel getroffen wird, wie es vor einigen Jahren einer Frau in Kanada passierte. Einmal in vielleicht einer Milliarde von Jahren steht zu erwarten, daß unser Planet mit einem wahrhaft gigantischen Himmelsobjekt zusammenkracht. Selbst eine solche Katastrophe bräche kein Naturgesetz. Im Gegenteil: Wenn etwas geschehen kann, dann geschieht es auch. Aus dem Blickwinkel der Wahrscheinlichkeitsrechnung verliert der Katastrophismus seine religiösen Beiklänge, deretwegen er so lange bei Wissenschaftlern außen vor war. Katastrophen können sich ereignen, haben sich ereignet und werden sich ganz sicher auch wieder ereignen, wenn nur genügend Zeit ins Land geht.

Als Darwin *On the Origin of Species* schrieb, stand er sehr stark unter dem Einfluß des unbeugsamen Aktualismus seines Freundes Lyell. So ging auch er von langsamen, sich schrittweise vollziehenden Prozessen aus, um Veränderungen im Sinne der biologischen Evolution zu erklären. Er postulierte einen einzigen Prozeß der natürlichen Zuchtwahl, den Lebenskampf, der zu jeder Zeit gleich heftig war und sich auf einem Planeten abspielte, der sich unaufhörlich in Details veränderte, doch nie einen abrupten *Status*-Wandel erfuhr. Seltsamerweise mußte er eine Menge Beweismaterial ignorieren, um zu einem so «sanften» Evolutionsbegriff zu kommen.

Die kürzesten geologischen Zeiteinheiten – Zonen und Stufen – sind für einen Experten daran erkennbar, daß eine Art, die zu einer bestimmten Zeit vorhanden ist, im Laufe der Zeit seltener wird oder sogar ausstirbt. Es ist auch möglich, daß eine neue Art auftaucht, die sich in keinerlei älteren Sedimenten findet. Deshalb variiert die Zusammensetzung der in einer fossilen Assemblage «vergesellschafteten» Arten je nach dem Alter des Sediments, in dem sie angetroffen wird. Sedimente gleichen Alters haben auch eine gleiche Fossilienzusammensetzung. Diese Veränderungen verlaufen schrittweise.

Die größeren Unterteilungen der geologischen Zeit unterscheiden sich dadurch, daß ihre Grenzen radikale Veränderungen der typischen Lebensformen markieren. Die Riesenechse von Maastricht und die zunehmend erstaunlichere Tierwelt aus Pterosauriern, Ichthyosauriern und Dinosauriern, die im Laufe des folgenden Jahrhunderts und darüber hinaus durch immer neue Funde belegt werden konnte, erscheinen nie in Sedimentschichten, die jünger sind als das Mesozoikum. Damals verschwanden auch zahlreiche andere Lebensformen aus den geologischen Befunden, die zuvor in ihrem jeweiligen Lebensraum vorherrschend gewesen waren. So sind die *Ammoniten*, die mein Sohn Peter auf dem Mont Vendôme fand, samt und sonders mesozoischen Ursprungs. Viele andere Mollusken, einschließlich einst so zahlreicher wie *Belemniten* und *Rudisten* starben zusammen mit den *Ammoniten* aus. Sogar extrem winzige, doch in geradezu astronomischen Zahlen vorkommende Lebensformen – einzellige Pflanzen und Tierchen, die man unter dem Sammelbegriff Plankton zusammenzufassen pflegt – verschwinden vollständig an der Trennfläche zwischen mesozoischen und kä-

nozoischen Sedimenten. Dies alles erklärt sich durch einen plötzlichen und drastischen Wandel der Aussterbensrate, der auf ebenso plötzliche und drastische Umweltveränderungen zurückzuführen ist.

Lyell wußte zwar nichts vom Plankton-Massensterben am Ende des Mesozoikums, doch war ihm das Aussterben sehr viel augenfälligerer Tierarten bekannt. Auf die Tierwelt in der Kreide von Maastricht eingehend, schrieb er:

Nach sorgfältigem Vergleich und nach Abzeichnung von mehr als 200 Muschelarten aus Maastricht war M. Deshayes nicht imstande, eine von ihnen mit den zahlreichen tertiären Muscheln in seiner Sammlung gleichzusetzen. Der Belemnit, einer der Kephelopoden [Kopffüßler], der in keiner Tertiärformation gefunden wurde, kommt in den Maastrichter Schichten vor. Auch ein Ammonit wurde in dieser Gruppe entdeckt.

Mit anderen Worten: Die von Lyell und Deshayes durchgeführten Untersuchungen fossiler Muscheln bestätigten somit das große Sterben am Ende des Mesozoikums, das Cuvier schon einige Jahrzehnte zuvor beobachtet hatte. Doch Lyell konnte seinen Widerwillen gegen Gewalt und Revolution nicht überwinden. Um seinen leidenschaftlichen Glauben an eine langsame und allmähliche Evolution aufrecht zu erhalten, obwohl der paläontologische Befund eher auf ein abruptes Aussterben hindeutete, nahm Lyell eine Lücke im Fossilienbefund an. In seinen *Principles* schrieb er (unter Verwendung der chronologischen Begriffe, die er erfunden und noch nicht revidiert hatte):

Also scheint es eine größere Lücke zwischen den organischen Überresten des Eozäns und den Lagern von Maastricht als zwischen dem Eozän und den neueren Schichten zu geben. Denn in den Eozänschichten gibt es Muschelarten, die auch heute noch existieren, doch in der jüngsten Sekundärgruppe keine Eozän-Fossilien. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß diese Unähnlichkeit der fossilen Überreste ein großes Zeitintervall anzeigt.

Darwin, der mehr als 20 Jahre später schrieb, schob die Ungleichförmigkeit der Lebensformen an der Grenze zwischen Mesozoikum und Känozoikum ebenfalls auf eine Zeitlücke. Seiner Ansicht nach war die Hinterlassenschaft von mindestens 100–200 Jahrmillionen aus den Sedimenten des geologischen Schichtenprofils erodiert – die Reste eines Zeitraums mithin, der länger gewesen sein müßte als das gesamte Känozoikum. Tatsächlich ging Darwin in seinem *On the Origin of Species* nur ganz kurz auf das Phänomen des Aussterbens ein. Seiner Auffassung nach reichte ja das bloße Auftauchen einer neuen Art als Todesurteil für ältere Arten hin:

Wie jede ausgewählte und begünstigte Form zahlenmäßig zunimmt, werden die weniger begünstigten abnehmen und seltener werden. Seltenheit aber, dies

lehrt die Geologie, geht dem Aussterben voraus. Doch wir können noch weiter gehen. Denn da beständig und in langsamen Tempo immer neue Formen produziert werden, müssen Arten unausweichlich sterben, wenn wir nicht davon ausgehen, daß sie sich beständig, ja nahezu endlos vermehren.

Mithin nahm er als gesichert an, daß allmähliche Verluste älterer Arten unausweichlich waren. Jede lebensuntüchtig gewordene Art alter Tier- und Pflanzenpopulationen war im Lebenskampf zum Untergang verurteilt.

In dem Jahrhundert nach dem Bekanntwerden der Ideen Darwins haben sich auch andere über diese Theorie des «natürlichen Aussterbens» den Kopf zerbrochen. Manche sahen eine Tendenz zur Entwicklung zunehmend spezialisierter Formen, die diese anfälliger für das Aussterben machten. So ist beispielsweise der Riesenpanda, der sich nur noch von einer bestimmten Bambusart ernährt, akut vom Aussterben bedroht, wenn diese seine ausschließliche Nahrung seltener wird.

Mit besonderer Berücksichtigung einiger der jüngsten Dinosaurierarten – des schrecklichen *Tyrannosaurus rex* oder des höchst kompliziert «bewaffneten» Stegosaurier – behaupten die Anhänger dieser Hypothese, daß extreme Anpassungsphänomene wie Gigantismus oder bizarr übertriebene Körperformen schon an sich eine Gefährdung darstellen. Vielseitig angepaßte Formen von bescheidener Körpergröße und weniger ausgefallene Lebensgewohnheiten sind dagegen von Natur aus lebensfähiger und besitzen aller Wahrscheinlichkeit nach höhere Reserven, sich an neue Gegebenheiten zu gewöhnen und ihre Lebensgewohnheiten umzustellen. Eingebettet in diese Vorstellung ist auch ein gewisses quantifizierendes Element: Der Evolution steht nämlich nur eine bestimmte Menge «Rohstoff» zur Verfügung; wenn eine Art ihren Anteil an diesem «Rohstoff» für exotische Eskapaden verschwendet, bleibt keine Reserve, die sie dann nutzen könnte, wenn sie sie am meisten brauchte.

Eine zweite, aber damit verwandte Theorie besteht in der Annahme, daß Arten altern, vergreisen und schließlich ihren natürlichen Tod sterben. Rund 165 Millionen Jahre lang beherrschten Dinosaurier die meisten Lebensräume auf Erden. Doch nach so langer Zeit hatten sie ihren «revolutionären Schwung» verloren und starben auch prompt aus.

An beiden Hypothesen ist etwas Wahres. Als erst einmal die Vögel die radikale Formumwandlung durchlaufen hatten, die unter anderem ihre Finger zu Flügelspitzen verschmelzen ließ, gab es kein Zurück zu den fünf Fingern ihrer echsenhaften Vorfahren mehr. Andererseits ist es durchaus möglich, daß ein fünfzehiges Säugetier seine Zehen verliert und seine Nägel sich in Hufe verwandeln, wie es bei Pferden und Schweinen geschehen ist, oder daß sich die Finger verlängern, um – wie bei den Fledermäusen – Flügel zu tragen. Außerdem sind Pandas nicht die einzigen Beispiele, die unter Beweis stellen, wie gefährlich zu einseitige Spezialisierung ist.

Auf der anderen Seite sind zahllose Lebensformen wiederum dermaßen spezialisiert, daß es sogar die erfahrensten Biologen verwundert; viele

dieser so hochgradig spezialisierten Lebewesen gehören zu den erfolgreichsten Lebensformen. Selbst die durchaus nicht hochentwickelte Meereschildkröte weist die von Biologen noch nicht ganz verstandene, aber jedenfalls erstaunliche Besonderheit auf, daß – wohl während ihres allmählichen Ganges durch die Entwicklungsgeschichte – ihre Schulterblätter vom Äußeren ihres Rippen-«Korbes» in dessen Inneres gewandert sind, um sich besser an ihren extrem spezialisierten Panzer anzupassen. Schildkröten überlebten das Mesozoikum, so wie sie schon vorher viele Jahrmillionen überlebt hatten.

Für die Vergreisungshypothese spricht die Beobachtung, daß Arten tatsächlich eine durchschnittliche Lebenserwartung haben. Beispielsweise beträgt die durchschnittliche Erwartung einer Säugetierart etwa eine halbe Million Jahre. Und doch lebten schon im Mesozoikum Opossums, welche die unmittelbaren Vorfahren der heutigen nordamerikanischen Opossums waren. Küchenschaben, dieses so überaus lebensstüchtige Ungeziefer, gibt es seit mehr als 300 Millionen Jahren, und *Lingula*, ein kleiner Armfüßer, weilt schon «unter uns», seit vor 600 Millionen Jahren am Beginn des Paläozoikums die ersten vielzelligen Lebewesen auftauchten.

Darwin wies darauf hin, daß im Laufe der Zeit ganze Gruppen zurückgehen. Sie umfassen immer weniger Arten, und jede Art weist immer weniger Individuen auf. Nach Auffassung einiger Paläontologen ist bei den fossilen *Ammoniten*, lange bevor sie am Ende des Mesozoikums ausstarben, ein derartiger Rückgang der Vielfalt und der Populationsziffer feststellbar. Auch die Pterosaurier befanden sich zweifellos auf dem absteigenden Ast, und gegen Ende ihres Zeitalters waren nur noch wenige übrig, die den letzten Vernichtungsschlag erlebten.

Allerdings strafen die Dinosaurier sowohl die «Monstrositäts»- als auch die Vergreisungshypothese Lügen. Robert T. Bakker von der John Hopkins Universität ist der Anführer einer revisionistischen Paläontologen-Fraktion, welche die alten, aus viktorianischer Zeit stammenden Kolossalgemälde des Dinosaurierlebens völlig «umgemalt» hat, wenn auch nicht – das sei eingeräumt – ohne erbitterten Widerspruch.

Wie heute die Säugetiere variierten die Dinosaurier von riesigen Körperformen bis hin zur Größe von Haushühnern, wenn auch keiner so riesig war wie ein Blauwal oder so winzig wie eine Hausmaus. Nach Bakkers anatomischen Rekonstruktionen wurden die Keratopssaurier, die bis zum bitteren Ende ihrer Ära überlebten, zu Monstern gemacht, indem man sie falsch rekonstruierte, um sie in Museen auszustellen. Eine erneute Untersuchung ihrer Fossilien deutet darauf hin, daß der dicke Knochenkragen, der ihren Hinterkopf «krönte», keineswegs freilag. Vielmehr befand er sich unter der Haut und diente als Befestigung sowohl der massiven Kaumusculatur, die es dem Tier ermöglichte, mit seinem Maul Holz zu zermalmen, als auch der dicken Nackenmuskeln, die seinen schweren Kopf zu tragen hatten. Verschiedene Keratops-Arten besaßen Hornanordnungen, die kaum bizarrer waren als die Hörner heutiger Nashörner.

Hadrosaurus – der Allgemeinheit besser als «Schnabeltier»-Saurier bekannt und stets halb untergetaucht in Sümpfen dargestellt, wo er glitschige Wasserpflanzen abweidet – war ebenfalls wohl weit weniger bizarr als die Phantasie derer, die die ersten Rekonstruktionen von ihm anfertigten. Den größten Teil des *Hadrosaurus*-Kiefers bedeckten Wangenmuskeln. Infolgedessen müssen die Tiere, was ihre Kopfform anging, eher wie Antilopen ausgesehen haben. Einige *Hadrosaurus*-Überreste fand man mumifiziert. An ihnen hafteten noch Fragmente ihrer Lederhaut. Doch eine derartige Mumifizierung kommt nur in sehr trockenem Gelände vor, und der ausgetrocknete Mageninhalt, der ebenfalls gefunden wurde, bestand aus Blüten und Zweigen trockener Hochlandbüsche. Diese Tiere weideten in Herden und leisteten sich Schaukämpfe mit ihrem Kopfschmuck, der – wie heute etwa Antilopenhörner – als Arterkennungsmerkmal und als Zeichen der Geschlechtsreife diente. Schließlich besaßen sie auch Hufe.

Auch die angeblichen Suhlgewöhnheiten von *Bronto*- und *Brachiosaurus* wurden in Zweifel gezogen. Die Knochen dieser Arten waren wie Brückenträger gebaut. Das Körpergewicht hing an den Pfeilern ihrer Beine wie eine Hängebrücke. Tatsächlich wanderten sie an Land umher, ja es ist bewiesen, daß sie Koniferennadeln abweideten.

Einige kleine Dinosaurier, insbesondere *Archaeopteryx*, den man lange für den ersten Vogel hielt, hatten Federn. Man fand heraus, daß ihr Körperbau dem anderer kleiner Dinosaurier sehr ähnlich war, und es liegen auch Beweise dafür vor, daß ihre Federn sich aus Schuppen entwickelt hatten, die der Isolierung einzelner Dinosaurierarten dienten und gar primär für den Vogelflug bestimmt waren. Alle diese Klein-Dinosaurier waren wahrscheinlich Insektenfresser.

Fossile Fußabdrücke und Nistplätze bezeugen, daß Dinosaurier auch ein gewisses Sozialleben entwickelt hatten. Tatsächlich entdeckte man gemeinsame Nistplätze pflanzenfressender Arten, wo sich auch Anhaltspunkte dafür fanden, daß die Nestlinge unter Aufsicht eines oder mehrerer erwachsener Tiere in regelrechten «Kinderhorten» aufgezogen wurden. Jungtiere, die alt genug waren, um die Herde zu begleiten, hinterließen ihre kleinen Fußabdrücke mitten zwischen den Fußabdrücken älterer Tiere – eine Position, die auch heute bei in Herden lebenden Tieren dem Schutz der Nachkommenschaft dient. Tyrannosaurier jagten vielleicht in Paaren. Kleinere Fleischfresser hinterließen Fußabdrücke, nach denen zu schließen sie in Rudeln gejagt haben müssen.

Was die schwerfällige Gangart jener Wesen angeht, die ihren mächtigen Schweif hinter sich schleppten – Wesen, wie sie vorzugsweise in sehr spät abends gesendeten Horrorfilmen zu sehen sind, so zeigen sowohl Skelette wie Spuren, daß es tatsächlich zweibeinig einhergehende Dinosaurier gab, Tiere, die auf mächtigen Läufen einherbalancierten, ihren Schweif steif und steil in die Höhe hielten und wohl fast so schnell rannten wie heute ein Sprinter. Im übrigen kann davon ausgegangen werden, daß sogar die schwersten vierfüßigen Keratopssaurier ebenso schnell rennen konnten wie

ein heutiges Nashorn. Vielleicht die schrecklichste aller «Schreckensechsen» war *Stenonychosaurus inaequalis*, dessen große Schädelkapazität, dessen «Zweikanalsehen» und dessen in Opposition zur Hand stellbare Daumen auf die Fähigkeit hindeuteten, sich zu einer Rasse intelligenter Wesen zu entwickeln, wie Bakker in seinem Artikel *Dinosaur renaissance* im Scientific American ausführte:

Als die Dinosaurier am Ende der Kreidezeit untergingen, waren sie keine vergeiste und dem Tode geweihte Gruppe, die ihre evolutionären Optionen verspielt hatte. Eher waren sie voller Lebenskraft, gliederten sich noch immer in neue Ordnungen auf und brachten eine Vielfalt großhirniger Fleischfresser hervor, die den höchsten Intelligenzgrad besaßen, der damals unter Landtieren anzutreffen war.

Kurz: Die Dinosaurier waren die entwickeltsten Tiere ihrer Zeit. Vielfältig und erfolgreich angepaßt als Insektenfresser, Pflanzenfresser und Fleischfresser. Doch trotz ihrer Anpassungsfähigkeit nach allen Seiten hin gab es auch spezialisierte Arten unter ihnen. Sie waren von unterschiedlicher Größe und bewohnten unterschiedliche Biotope, blühten 165 Millionen Jahre und zeigten keinerlei Anzeichen, ihr glanzvolles Dasein ohne weiteres aufzugeben.

Ammoniten, *Belemniten* und *Rudisten* hielten sich ebenfalls bis hin zum Anbruch des Känozoikums. *Ammoniten* gab es noch, grob gesprochen, 200 Millionen Jahre. Sie waren freischwimmende *Kephalopoden* – Verwandte der zehn- und achtfüßigen Tintenfische –, die sich mit ihren Fangarmen durchs Wasser strudelten – dies von der «Festung» einer spiralförmig gerollten Muschelschale aus, die von der Größe etwa einer Münze bis zu den Ausmaßen eines Lkw-Reifens variierte. Überall in ozeanischen Sedimenten findet man die Fossilien dieser kosmopolitischen Raubtiere.

Verglichen mit dem ehrwürdigen Alter der *Ammoniten* waren die *Belemniten* gerade erst im Kindergartenalter. Sie stellten eine im Kommen befindliche Gruppe dar, die sich erst in der Kreidezeit herausgebildet hatte. Ihr Lebensraum war eingeschränkt. Daher finden sich ihre Überreste nur an wenigen Stellen, doch wo ihnen die Lebensbedingungen zusagten, das heißt in jenem Meer, von dem heute Kreideablagerungen übrig sind, sind ihre einem Schreibstift ähnelnden Gehäuse sehr zahlreich.

Fraglos befanden sich die *Rudisten* auf dem Gipfel ihrer Entwicklung. Sie waren zweischalige Mollusken, die eine erstaunliche Artenvielfalt umfaßten. Unzählige Einzelwesen, die wie Austern auf dem Meeresboden lebten, bildeten riesige Muschelbänke. *Rudisten* waren die Riff-Erbauer ihrer Tage und beherrschten einst die Tropenmeere wie heute die Korallen. Solche Tiergemeinschaften leben Millionen von Jahren an derselben Stelle und türmen durch die Häufung ihrer Muscheln das Riff auf. Wiederholt sich diese Besiedlung über Zeitspannen von 50 Millionen Jahren und mehr, so können die Formationen der Rudistenriffe mehrere 100 Meter dick werden. Heute sind sie erstklassige Rohöl-Reservoirs.

Was das Plankton betrifft, so waren dessen Formen nie so vielfältig und vermehrungsfreudig wie am Ende des Mesozoikums. Planktonfossilien aus den jüngsten Kreidesedimenten finden sich in solchen ozeanischen Schichten wie denen im Pariser Becken pro Kubikzentimeter millionenfach. Aus welchen Gründen auch immer – dem Plankton ging es nie so gut wie unmittelbar vor seiner nahezu totalen Zerstörung. Und auch seine Nachkommen fanden und finden nie mehr so günstige Bedingungen.

Lyell und Darwin – sowie Generationen von Wissenschaftlern nach ihnen – kannten nicht die zahlreichen und sehr viel präziseren Untersuchungen, die größtenteils erst in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts durchgeführt wurden. Deshalb kann man es entschuldigen, wenn sie sich die Dinosaurier oder die «fossilen Echsen» als schwerfällige Geschöpfe von äußerst geringer Intelligenz vorstellten, die wie Greise umhertappten, oder wenn sie ein Schwinden der *Ammoniten* wahrnahmen, über das Plankton jedoch überhaupt nicht nachdachten. Tatsächlich wissen wir heute zwar mehr, doch noch immer läßt sich trefflich darüber streiten, ob *Ammoniten* und Dinosaurier in der Blüte ihres Lebens als Art standen oder im Rückgang begriffen waren. Dies berührt jedoch eine Tatsache in keiner Weise, die heute für alle Naturwissenschaftler feststeht: Ein Gesamtanteil von 75 % aller Arten, die am Ende des Mesozoikums existierten, gelangt niemals wieder in die Fossilienbefunde, Großlebewesen ebenso wie kleine, Pflanzen sowohl als Tiere, Landbewohner ebenso wie Seebewohner. Unter ihnen befanden sich Arten, die bis zu jenem Zeitpunkte Hunderte von Jahrmillionen überlebt hatten, sowie junge Arten, die gegen Ende des Mesozoikums den Gipfel der Evolution repräsentierten.

Diese Tatsache fällt aus dem Rahmen und ruft nach einer ebenso den Rahmen des Üblichen sprengenden Erklärung. Denn nichts verbindet all diese Tausende verschiedener Arten, wenn nicht ihr gemeinsames Aussterben. Die von Lyell und Darwin vorgeschlagene und seither von allen aktualistischen Geologen heftig verfochtene Erklärung scheint die einfachste zu sein: Nach ihrer Ansicht gab es eine Zeitlücke von mindestens 100 Millionen Jahren, in deren biologischer Hinterlassenschaft, wenn sie nicht erodiert wäre, wir mit Sicherheit fänden, daß all die einzelnen Arten von Organismen, jede für sich, allmählich und aus ganz alltäglichen Ursachen zugrunde gingen.

Doch gibt es diese Lücke im geologischen Befund wirklich?

Keine Lücke im Schichtenprofil von Gubbio

Im Jahre 1953 beendete ich meine Dissertation an der *University of California* in Los Angeles und ging nach Houston, um dort im Frühjahr 1954 meine Arbeit für die Shell-Forschungslaboratorien anzutreten. Kurz nachdem ich angekommen war, lud mich ein Freund von der Universität Houston zum Lunch ein. Die Universität expandiere, sagte er, es gebe Diskussionen um die Besetzung von Stellen, und – so fügte er voller Stolz hinzu: «Doktor Stenzel wird den Lehrstuhl für Geologie erhalten.»

Heinrich Stenzel war in der früher deutschen Stadt Stettin (heute polnisch Szezecin) in Pommern geboren und während der Jahre der großen Depression nach Amerika gegangen, wo er für das *Texas Bureau of Economic Geology* arbeitete. Er qualifizierte sich zu einem hervorragenden Paläontologen, spezialisierte sich auf die Wirbellosen-Faunen des späten Mesozoikums und frühen Känozoikums und wurde schließlich zum Präsidenten der Paläontologischen Gesellschaft der USA gewählt. Mein Freund hatte mithin allen Grund, darauf stolz zu sein, daß ein so hervorragender Wissenschaftler bereit war, den Ausbau des Fachbereiches, an dem er selbst tätig war, in die Hand zu nehmen.

Die Flitterwochen waren kurz. Sein Leben lang der Typ eines Beamten mit preußischem Drill, wurde Stenzel berufen, um zu kommandieren und für Ordnung zu sorgen. Dieser Verwaltungsstil aber stieß auf wenig Gegenliebe in einer Institution, in der akademische Freiheit und Autonomie mit all ihren bisweilen chaotischen Aspekten die höchsten Ideale waren. So kam es unter den «Jungtürken» des Fachbereichs zu einem Aufstand, und Stenzel mußte seinen Thron als Fachbereichsleiter aufgeben. Seine Freunde bei Shell, aufgebracht über die, wie sie meinten, harte Art, in der die Universität mit Stenzel umgesprungen war, forderten ihn auf, sich uns als Berater anzuschließen. So sollte ich aus erster Hand lernen, wie heiß das Thema des Grenzverlaufes zwischen Kreidezeit und Tertiär umstritten war.

Meine damalige Arbeit für Shell bestand darin, den Ursprung der Sandkörner an texanischen Stränden zu bestimmen. Obwohl ein flüchtiger Beobachter glauben könnte, der Ozean spüle den Sand der Strände an, verhält es sich an manchen Orten gerade umgekehrt: Der Sand ist ein Erosionsprodukt des Festlandes und wird vom Festland zur Küste hinabgewaschen. Ein Sandkorn kann daher tief aus dem Landesinneren und von Felsgestein unterschiedlichen Ursprungs stammen. Ein großer Teil des Sandes am Strande von Galve-

ston stammte von anstehendem Felsgestein kreidezeitlichen und tertiären Ursprungs im Binnenland. Deshalb entschied mein Chef, mich zusammen mit Doktor Stenzel zur Felderkundung nach Ost-Texas zu schicken.

Es war von Houston aus eine lange Reise, doch wir kamen nie an einen «toten Punkt». Doktor Stenzel war außerordentlich gesprächig und ließ nie eine Chance für ein Streitbares Fachgespräch ungenutzt. Diesmal war sein Thema eben jener Streit um die Grenze zwischen Kreide und Tertiär, von der oben die Rede war, um jenen Horizont also, der das Ende des Mesozoikums (in dem die Dinosaurier lebten) und den Beginn des Känozoikums markierte, in dem die Säugetiere zur beherrschenden Lebensform wurden.

Ein Streitgespräch über den exakten Verlauf geologischer Grenzlinien war und ist stets ein beliebter Zeitvertreib für Geologen. T. C. Chamberlain, um die Jahrhundertwende ein vielgerühmter Gelehrter der Universität von Chicago, glaubte, die Erdgeschichte sei immer wieder durch Revolutionen akzentuiert worden, die er als natürliche Grenz- und Wendemarken geologischer Perioden ansah. Seiner Ansicht nach endete das Mesozoikum mit einem gewaltigen «Donnerschlag», durch den – worin auch immer er bestand – sämtliche Dinosaurier und alle *Ammoniten* getötet wurden. Ed Spiecker nahm den entgegengesetzten Standpunkt ein. Als strenggläubiger Lyell-Anhänger lehrte er uns, daß Vorstellungen wie «Katastrophe» und «Revolution» der Geologie dermaßen viel Schaden zugefügt hätten, daß man sie besser aus allen geologischen Hand- und Lehrbüchern streichen sollte. Er behauptete, der auffällige Wandel in den Sukzessionen (den im geologischen Befund aufeinanderfolgenden Assemblagen, «Vergesellschaftungen» pflanzlicher und tierischer Lebensformen) habe sich in drei unterschiedlichen Horizonten ereignet, und zwar in einer von ihm angenommenen langen Übergangsphase vom Mesozoikum zum Känozoikum. Die *Ammoniten*, diese großen und schönen, der Nautilusmuschel verwandten Mollusken, seien zuerst ausgestorben, und dies sei gegen das Ende der Maastrichtstufe hin geschehen. Die beiden anderen großen Veränderungen, die der Pflanzenwelt und die der Wirbeltiere, seien dagegen später aufgetreten. Süßwassermollusken hätten inzwischen keinerlei nennenswerte Evolutionsschritte vollzogen. Aus dieser Sicht behauptete Spiecker, alle geologischen Zeiteinteilungen seien rein künstlich. In einem Exemplar seines Lebenswerkes über die spätmesozoische und früh-känozoische Geschichte Zentral-Utahs (*Late Mesozoic and Early Cenozoic History of Central Utah*), das er mir geschenkt hatte, hatte er folgenden Abschnitt unterstrichen:

Wenn man ausgeprägte Veränderungen in der Fossilienabfolge zur Grundlage der Grenzziehung zwischen Kreide und Tertiär macht, so entgeht man nicht der Gefahr, einem Irrtum aufzusitzen, ja es könnte sein, daß sie, frei heraus gesagt, einfach willkürlich erfunden ist.

Ich war ein so braver Schüler und getreuer Anhänger der Ansichten meines Lehrers, daß ich mich stark fühlte, die obigen Sätze sinngemäß in meine Diskussion mit Stenzel einzubringen. Es war, als ob ich vor einem gereizten

Stier ein rotes Tuch geschwenkt hätte. Stenzel brauste auf: «Sie wissen überhaupt nichts über Fossilien junger Mann, und auch Ihr verehrter Lehrer hat nicht viel Ahnung von Paläontologie.» Und dann informierte er mich: Die Ergebnisse eines erst jüngst abgeschlossenen Forschungsvorhabens ließen gar keinen Zweifel zu. Während Spiecker behauptet hatte, die *Ammoniten* seien ein gutes Stück vor den Dinosauriern ausgestorben, versicherte Stenzel, beide so völlig verschiedene Arten seien gleichzeitig untergegangen. Spiecker, so erklärte er mir, habe nur einen weitverbreiteten Fehler wiederholt, wenn er das Verschwinden der Dinosaurier am Ende der späteren Danium-Stufe ansetze.

Wenn aber das Mesozoikum ein ganz natürliches Ende gefunden habe, so fragte ich, was solle dann der ganze Streit um die Grenze zwischen der Kreide und dem Tertiär?

«Ich muß Ihnen eine Lektion über die Geschichte der Geologie erteilen», erwiderte Stenzel. «Es war alles die Schuld eines Franzosen namens Desor.»

Lyell hatte die Kreideschichten bei Maastricht in Holland ganz korrekt als die jüngsten, letzten Sedimente der Kreidezeit identifiziert. Die Obergrenze dieser Kreide markiert das Ende des Mesozoikums. Für die Zeit, in der diese Sedimente sich ablagerten, bürgerte sich der Name Maastrichtien ein, der die letzte Stufe der letzten kreidezeitlichen Epoche bezeichnet. Bis hierher war alles in Ordnung, hätte nicht 1846 Eduard Desor (der, ganz nebenbei, gar kein Franzose, sondern ein in Deutschland geborener Schweizer war) eine Exkursion zu der dänischen Küste südlich von Kopenhagen unternommen – ganz in die Nähe des Dorfes Stevns' Klint. Dort umfaßte die Sedimentfolge vier Elemente: Ein unteres Kreidelager, zwei obere Schichten aus Kalkstein, und zwischen der weißen Kreide und dem weißen Kalkstein eine dünne, dunkelgraue Schicht aus Ton, dem sogenannten «Fischton» (weil man in ihm fossile Fischgräten fand). Beides, die Kreide und der Kalkstein, sind Sedimente, deren Ursprung aus Kalziumkarbonat bestehende Skelette der Meeresorganismen sind, die, sobald sie absterben, zu Boden sinken. Ton dagegen ist nichtorganischen Ursprungs. Er besteht aus feinen Staubpartikeln, die vom Festland, ja sogar aus dem Weltraum stammen.

Ein dänischer Molluskenspezialist, Johann Georg Forchhammer, hatte schon zwei Jahrzehnte zuvor die vier Sedimente von Stevns' Klint untersucht. Die Überreste der fossilen Weichtiere im unteren und älteren der beiden Kalksteinlager veranlaßten ihn zu der Annahme, dieses stamme bereits aus dem Tertiär, sei also känozoischen Ursprungs. Allerdings war Desor auf Stachelhäuter spezialisiert – jene Gruppe von Lebewesen, zu denen Seeigel, Seelilien, Seesterne und andere Meeresbewohner mit radialsymmetrischem Körperbau zählen, bei dessen Symmetrie die Zahl 5 eine entscheidende Rolle spielt. Er erkannte, daß eine ganze Reihe von Stachelhäuter-Arten in der unteren Kalksteinschicht anderen Arten glichen, die aus der Kreidezeit, also aus dem Mesozoikum, nicht aus dem Känozoikum stammten. Für das durch dieses Sediment repräsentierte Zeitintervall schlug er die Bezeichnung Danium (oder Danien) vor. Auch den «Fischton» sowie die Kreideschicht darunter schrieb er dem gleichen Zeitraum zu. Für ihn war das

Daniam die letzte Stufe des Mesozoikums. Doch obwohl die Stachelhäuter, die Desor identifizierte, tatsächlich in der Kreidezeit lebten, handelte es sich doch bei ihnen nicht um dieselben Arten. Inzwischen haben die meisten Paläontologen erkannt: Die «Fischton-Grenze» markiert einen deutlichen Wandel in der Stachelhäuter-Fauna. Die Fauna unter dem Ton betrachten sie als kreidezeitlich, die aus der Schicht über dem Ton aber bereits als sehr typisch für das Tertiär. Desor hatte einen argen Mißgriff getan, als er die weiße Kreide, den «Fischton» und den Kalkstein darüber zu einer einzigen Formation, dem Danium, zusammenfaßte. Der «Fischton» ist ziemlich frei von faunalen Überresten, abgesehen von den zerbrochenen Fischskeletten, denen er seinen Namen verdankt. Die Kreide darunter enthält eine Fauna, die von der Kalksteinschicht darüber vollständig verschieden ist. In dieser weißen Kreide gibt es *Ammoniten*, *Belemniten*, *Rudisten* und andere typische mesozoische Muscheln wie auch sonst überall in Sedimentschichten des Maastricht-Typus. In dem aus dem Danium stammenden Kalkstein über dem Fischton dagegen fehlen sie ganz und gar.

Erfahrene Paläontologen wie Heinrich Stenzel wußten, daß Desor sich geirrt hatte. Die weiße Kreide unter dem Fischton ist maastrichtzeitlich. Charakteristisch für die «revidierte» Daniumstufe, für das Danium im eigentlichen Sinne, ist die älteste Fauna tertiären Typs. Wäre Desor ein Ammonitenspezialist gewesen, hätte er sich mit Mollusken, Mikrofossilien oder Nannofossilien ausgekannt – oder hätte er wenigstens genau auf die Arten von Stachelhäutern geachtet, hätte er nie ein Sammelsurium so wenig zueinanderpassender Bettgenossen für eine einzelne Tierdynastie erklärt. Nach heutiger Definition entspricht die Daniumstufe dem «Fischton» und den darübergelagerten Kalksteinen. Zwischen der weißen Kreide, der letzten Schicht der Maastrichtstufe, und dem «Fischton», der ersten des Danium, vollzog sich eine der tiefgreifendsten und folgenschwersten Veränderungen der Lebensformen in der Geschichte der Erde. Dennoch bestand die Verwirrung unterschwellig weiter und brachte Spiecker (aber auch andere) dazu, das Aussterben der *Ammoniten* der Maastrichtphase, das Sterben der Dinosaurier dagegen dem Danium zuzuweisen.

Auch Spiecker glaubte, daß die geologischen Befunde nicht vollständig seien. Fast ein Jahrhundert nach Darwins *On the Origin of Species* schrieb er:

Das Fehlen von Vorfahren für so viele bedeutende Tiergruppen, die plötzlich, voll entwickelt, in der Fossilien-Sukzession auftauchen, sollte uns noch mehr, als dies offensichtlich der Fall ist, davon überzeugen, daß der geologische Befund unvollständig ist, und in Anerkennung dieser Unvollständigkeit ist es unmöglich, die Theorie einer bedeutenden Veränderung der Evolutionsrate aufrecht zu erhalten.

Ich zitierte diese Auffassung meines Lehrers, nur um von Heinrich Stenzel eine weitere Lektion zu erhalten: «Jawohl, viele Gruppen tauchen plötzlich auf, aber nicht, weil der geologische Befund unvollständig ist, sondern einfach, weil sie wirklich plötzlich auftauchen.»

Zwar gab Stenzel zu, daß bei der Erhaltung von Fossilien der Zufall eine gewisse Rolle spielt. Tatsächlich hinterließen nur sehr wenige der Organismen, die je lebten, der Nachwelt ihre Fingerabdrücke. Doch was die Mikrofossilien angeht, sind die Befunde alles andere als unvollständig. Jeder Kubikzentimeter eines Tiefseesediments enthält Abertausende winziger Skelette einzelliger Lebewesen, die man *Foraminiferen* nennt. Schon Jahrzehnte früher, im Jahre 1931, hatte Stenzels Kollegin Helen Jeanne Plummer vom «Büro» in Austin entdeckt, daß alle *Foraminiferen*-Arten, die der Gattung *Globotruncana* angehörten, am Ende der Maastrichtstufe plötzlich ausstarben. Die ersten Danium-Sedimente enthalten eine völlig neue *Foraminiferen*-Assemblage. Sie waren noch nicht weit in ihrer Entwicklung, doch sie waren die Vorfahren der noch heute in den Ozeanen lebenden Mikrofauna-Populationen.

Nach drei Tagen war die Arbeit in Ost-Texas getan, und unsere Exkursion war beendet. Meine Auseinandersetzung mit Heinrich Stenzel war für mich nur eine intellektuelle Etüde. Mit der Materie nur unzureichend vertraut, wußte ich von Stenzel nur, daß er in Verwaltungsdingen willkürlich und dogmatisch war, und genau dasselbe argwöhnte ich im Hinblick auf seine wissenschaftlichen Ansichten. Also blieb ich skeptisch. Außerdem bereiteten mir damals ganz andere Dinge Kopfzerbrechen, und mehr als zwanzig Jahre lang war ich in keinerlei Diskussion des «Grenzproblems» mehr verwickelt. Für Stenzel dagegen war die Sache keineswegs erledigt. Er brachte seinen ersten Doktoranden an der Universität Houston dazu, die Kreide-Tertiär-Grenzfrage zu untersuchen und zum Thema seiner Dissertation zu machen.

Bill Berggren arbeitete tagsüber als Labortechniker bei Shell und hatte an der Universität Abendkurse belegt. Als er sein naturwissenschaftliches Bakkalaureat erworben hatte, sandte Stenzel ihn nach Skandinavien, um dort die Foraminiferenfauna der Maastricht- und der Daniumstufe zu studieren.

Foraminiferen waren erstmals 1826 von dem französischen Paläontologen Alcide Dessalines d'Orbigny (1802–1857) beschrieben worden. D'Orbigny hielt sie für winzige *Ammoniten*, weil ihre Gehäuse eine oberflächliche Ähnlichkeit mit den spiralförmig gewundenen und mit Kammern versehenen Gehäusen dieser Mollusken aufweisen. Wie Menschen, die ihr Haus durch Anbauten erweitern, wenn ihre bisherigen Wohnräume ihnen zu eng werden, bauen *Foraminiferen* unmittelbar vor ihrer Kammer eine neue, die geräumiger ist. Das lebende Tier bewohnt stets nur die äußerste Kammer. Der Name *foraminifer* bezieht sich auf die *foramina* («Löcher», «Öffnungen») zwischen den aufeinanderfolgenden Kammern, die in einer Spirale oder hintereinander angeordnet sind.

Untersuchungen lebender *Foraminiferen* ergaben, daß es sich bei diesen Lebewesen nicht um Zwerg-Mollusken handelt, sondern um einzellige Organismen. Viele Arten von ihnen leben auf dem Meeresboden. Man bezeichnet sie als benthische Formen (von griechisch *bénthos* [«die Meerestiefe»]).

Andere dagegen bewohnen höhere Wasserregionen der Ozeane. Diese bezeichnet man als planktonisch (von griechisch *planktós* [«herumgetrieben»]), was allerdings nicht ganz zutrifft, denn *Foraminiferen* schwimmen oder tauchen mehr, als daß sie getrieben werden...

Foraminiferen sind klein. In der Regel messen sie weniger als 1 Millimeter im Durchmesser, wenn es auch ungewöhnlich große Formen auf mehr als 5 Zentimeter bringen. Die größeren sind meist benthisch (also Meeresbodenbewohner). Da die Formgebung ihrer Gehäuse charakteristischer ist und sie besser sichtbar sind, beschäftigen sich die Wissenschaftler seit d'Orbignys Tagen immer wieder mit ihnen. Fossile *Foraminiferen* fand man schon in Felsgesteinen, die bis auf das frühe Kambrium zurückgehen, doch die unter der Bezeichnung *Nummuliten* bekannten, größeren benthischen Arten sind erst seit dem Tertiär belegt. Schon um die Mitte des vorigen Jahrhunderts war es klar geworden, daß nummulitische Formationen ebenso die fossile «Erkennungsmarke» des Känozoikums sind wie die *Ammoniten* zumindest eines der «Markenzeichen» des Mesozoikums.

Planktonische *Foraminiferen* sind selten ohne Mikroskop sichtbar; die formalen Unterschiede zwischen den Arten sind subtiler. Dennoch – als Berggren 1957 nach Dänemark geschickt wurde, um Desors *Danum* zu untersuchen, war die Technik, mikroskopisch kleine *Foraminiferen* auszusieben, schon fortgeschritten, und man hatte bereits weitgehend die Taxonomie der verschiedenen Arten festgelegt. Mithin konnte Berggren in den dänischen Sedimenten systematische Forschungen an planktonischen *Foraminiferen* durchführen. Zum Vergleich zog er Belegmaterial gleichen Alters aus Japan, Westafrika, der Sowjetunion, Schweden, Grönland und Mexiko sowie aus den US-amerikanischen Küstengebieten des mexikanischen Golfes, des Atlantiks und Pazifiks heran. Im Jahre 1960 konnte er dem Internationalen Geologenkongreß verkünden: «In den Maastrichtschichten in Dänemark und Skandinavien kommt keine Art tertiären *Foraminiferen*-Planktons vor. Der Verfasser fand auch an anderen Orten kein zweifelsfreies Vorkommen in den zahlreichen faunalen Zusammenhängen maastrichtzeitlicher Sequenzen.» Er vermerkte auch, was er «einen der gordischen Knoten in der geologischen Wissenschaft» nannte: Die Gehäuseformen von Arten aus der Kreidezeit unterschieden sich so stark von den Gehäuseformen tertiärer Arten, daß eigentlich zwischen beiden Perioden eine beträchtliche Zeit evolutionärer Entwicklung verstrichen sein mußte.

Doch nur der «Fischton» trennte die Sedimente der beiden Perioden. In ihm fand sich von *Foraminiferen*-Fossilien keine Spur. Berggren, noch immer von den Behauptungen Lyells und Darwins beeinflusst, die eine mächtige Kluft zwischen Kreidezeit und Tertiär annahmen, sah eine Lücke in den Belegen ihrer evolutionären Entwicklung. Allerdings verfügte er über keinerlei Möglichkeit, die Länge des Zeitraums zu bestimmen, für den es keine Belege gab. Die radiometrische Datierung der geologischen Formationen ergab lediglich, daß die angenommene Kluft nicht so groß war, wie Lyell

behauptet hatte – sie konnte nicht größer als eine Million Jahre sein. Konnte sie auch kleiner sein?

Um eine Antwort auf diese Frage zu finden, begaben sich die Geologen nach Gubbio in Italien. Gubbio ist eine kleine mittelalterliche Stadt. Autofahrer, die soeben die engen Straßen von Assisi hinter sich haben, übersehen gewöhnlich das Schild *Città delle Arte* («Kunststadt»), das auf Gubbio hinweist. Nachdem sie im Kloster und der zugehörigen Kirche des heiligen Franziskus all die Fresken von Giotto gesehen haben, machen nur noch wenige einen Abstecher, um die paar Altarbilder in Gubbios provinzieller Kathedrale zu besichtigen. Dafür wurde die Stadt zum Mekka der Geologen. Die als *scaglia rosa* («rosa Schuppe», «rosa Splitter») bezeichnete Abfolge von Sedimenten vor der Stadt belegt besser als jede Schichtenfolge irgendwo auf der Welt den Übergang vom Mesozoikum zum Känozoikum im Grenzbereich zwischen Kreide und Tertiär.

Bei der *scaglia* (der «Schuppe», dem «Splitter») handelt es sich um Sedimente des Tethys-Meeres, eines Vorläufers von Mittelmeer, Schwarzem Meer, Kaspischem Meer und Aralsee. Vor rund 15 Millionen Jahren faltete sich ein Teil des Tiefseebodens empor und bildete die Apenninen, heute das «Rückgrat» Italiens. Erosion legte die Sedimente aus dem Mesozoikum und Känozoikum frei, die nun heute frei anstehender Fels sind; dazu gehört auch die *scaglia*. Material für die paläontologische Erforschung des Lebens in einem urzeitlichen Meer kann man einfach am Straßenrand auflesen. Mehrere Jahre nach Berggrens Bericht über die *Foraminiferen* machten sich zwei andere Experten auf den Weg – nur um einmal nachzusehen, was sich in der Evolution der *Foraminiferen* ereignet hatte. Isabella Premoli-Silva, eine rothaarige toskanische Gräfin, die in Mailand Mikropaläontologie studiert hatte, und ihr Schweizer Kollege Hans Peter Luterbacher spürten, daß etwas in der Luft lag. Etwas mußte sich am Ende der Kreidezeit ereignet haben. Beide gingen auf die Suche nach einem vollständigen Profil der Sedimentschichten, um hinter das Geheimnis der bemerkenswerten Evolutions-Diskontinuität zu kommen, und sie fanden, was sie suchten, in der *scaglia* bei Gubbio, nicht weit von der Heimatstadt der Gräfin Premoli-Silva entfernt. Der gemeinsame Bericht, den sie 1969 veröffentlichten, bestätigte, was Berggren herausgefunden hatte, und fügte neue, ergänzende Details hinzu. Die letzte Fauna aus der Kreidezeit umfaßte unter anderem eine vielfältige Plankton-Population aus *Globotruncanen*, *Ruboglobigeriniden* und *Heterohelliciden* – alles Familien der *Foraminiferen*. Diese «Herumtreiber» gliederten sich in Dutzende von Arten, die sich etwa 5–10 Millionen Jahre in den warmen Kreide-Meeren getummelt hatten.

Keine Frage: Seit der Mitte der Kreidezeit hatten sich die *Foraminiferen* rapide entwickelt, und am Ende dieser Periode hatte diese Entwicklung ihren Höhepunkt erreicht. Es gab nicht das geringste Anzeichen von Vergreisung, keinen Rückgang der Populationsziffer, als ganz plötzlich alle kreidezeitlichen Lebensformen buchstäblich abgeschnitten wurden – die Grenzlinie am

Ende der Kreidezeit wirkt, wie mit dem Rasiermesser gezogen. Alle drei Familien, alle Gattungen, die sie umfaßten, und sämtliche Arten, die zu diesen Gattungen gehörten, verschwanden, um in den Faunen des Känozoikums nie wieder aufzutauchen.

Dermaßen viele *Foraminiferen* hatte es gegeben, daß ihre «Skelette» zusammen mit den kalkigen Absonderungen sehr kleiner Pflanzen, die man als Nannoplankton bezeichnet, den größten Teil der jüngsten Kreide-Sedimente bei Gubbio bildeten. Bei diesen Sedimenten handelt es sich um Kalkstein, das typische weiße Felsgestein, das aus den Resten von Muschelfossilien besteht. Unmittelbar über dieser Kalksteinschicht befindet sich eine Tonschicht. Wie der «Fischton» in Dänemark ist auch der Ton bei Gubbio nahezu frei von Fossilien und weist sich so als Hinterlassenschaft eines Ozeans aus, der praktisch «tot» war. Diese Tonschicht – heute als «Grenzton» bekannt, weil sie zwischen die letzten fossilen Schichten des Mesozoikums und die ersten fossilen Schichten des Känozoikums eingebettet ist, ist bei Gubbio nur einen Zentimeter dick. Über ihr liegt wieder Kalkstein, und in diesem Kalk fanden Premoli-Silva und Luterbacher Fossilien extrem kleiner *Foraminiferen*.

Während die kreidezeitlichen Formen robust waren und es auf Durchmesser von 0,5 oder 1 Millimeter brachten, waren die ersten tertiären Arten Zwerge und erreichten nur etwa ein Zehntel der Größe ihrer ausgestorbenen Vorgänger. Sie bilden die *Globigerina-eugubina*-Zone, die erste faunale «Dynastie» planktonischer *Foraminiferen* – und den primitiven Urahnenstamm, aus dem die jetztzeitliche Familie der *Globigeriniden* hervorging. Berggren und andere hatten diesen «eugubinischen» Typus (eugubinisch nach *Iguvium* bzw. *Eugubium*, dem antiken Namen von Gubbio) einfach übersehen, weil diese Tiere so extrem klein sind. Die känozoischen Kalkgesteine bei Gubbio zeigen, daß ihre Evolution rasch vor sich ging. Je mehr sich die Arten entwickelten, desto größer und vielfältiger wurden sie. Im Kalkgestein, das etwa 5 Meter über dem Grenzton liegt, verschwanden die kümmerlichen, primitiven Arten ganz. An ihre Stelle traten viele neue Arten robuster «Herumtreiber».

Die Entdeckung des «eugubinischen» *Foraminiferen*-Typs durch Luterbacher und Isabella Premoli-Silva war nur durch die Verwendung eines außergewöhnlich feinen Siebes ermöglicht worden. Ihre Bedeutung lag darin, daß sie Zweifel an der angeblichen Lücke im geologischen Fossilien-Befund aufkommen ließ. Obwohl diese Episode in der Evolution der *Foraminiferen* überraschend schnell vor sich ging, schien der Übergang von den kleinen, primitiven Arten zu einer reichen und robusten Fauna absolut vollständig.

Lücken im geologischen Befund sind in flachen, marinen Abfolgen auf dem Kontinent normal. Die oberste Schicht der Erdkruste liegt Tausende von Metern höher als der Meeresboden. Ständige Aktivität in der Erdkruste kann einen Kontinent noch höher heben, aber auch seine tiefer gelegenen Teile um Hunderte von Metern unter den Meeresspiegel versenken. Mithin kann ein Teil des Kontinents zeitweilig Land sein, um dann wieder, wie etwa die Nord-

und Ostsee, ein flaches Küstenmeer zu werden. Aber von den mäßigen Hebungen und Senkungen der Kontinente ganz abgesehen – auch die Höhe des Meeresspiegels kann sich weltweit verändern. Was die Geologie lehrt, ist daher ein ermüdendes Hin und Her von Meerwassereinbrüchen an Land (Transgressionen) und Zurückweichen der See (Regressionen). Während der Transgressionsphasen werden Landsedimente von Sedimenten meerischen Ursprunges überlagert. Dies ist auch gut so, denn jede Sedimentschicht schützt die, die darunterliegt. Während der Regressionen wird dagegen anstehender Boden durch Erosion abgetragen. Dadurch verschwinden Sedimentschichten aus dem Bodenprofil, und in Küstennähe legen sich Flußsedimente über die einstigen Ablagerungen aus dem Meere. Kommt dann das Meer wieder zurück, werden über den Landsedimenten erneut Sedimente ozeanischen Ursprunges abgelagert – auch dort, wo früher abgelagerte Sedimente marinen oder kontinentalen Ursprunges durch Erosion abgetragen wurden. Lücken im Belegmaterial über das Leben im Meer sind also durchaus an der Tagesordnung, wenn es sich um Sediment-Sequenzen an Land handelt. Das Pariser Becken, aus dem Cuvier seine faszinierende Fossilien-sammlung bezog, ist ein Beispiel dafür. Da sich das Pariser Becken mehrmals aus dem Meer erhob und es mithin mehrere Regressionsphasen gab, wurden nach jeder Flut Sedimente erodiert, so daß unvermeidlicherweise Lücken im Befund entstanden.

Die leichte Kruste eines Kontinents sitzt auf einem schweren Substrat, dem 2900 Kilometer dicken Erdmantel, und sie kann nie so tief sinken wie ein Ozeanboden. Der Boden der Ozeane dagegen liegt geschützt unter Tausenden von Metern Seewasser, um nur in den ganz seltenen Fällen an die Oberfläche gehoben zu werden, wenn Kontinente zusammenprallen. Das lückenloseste Belegmaterial für das Leben im Meere findet man daher aller Voraussicht nach, wenn man dem Tiefseeboden Sedimentproben entnimmt. Derartige Sedimente bezeichnet man nach dem griechischen Wort für «offene See» (*pélagos*) als «pelagisch». Heute entnimmt man solche Sedimentproben mit Hilfe von Tiefsee-Bohrschiffen. Doch als die Forschungen in Gubbio stattfanden, sollten noch sieben Jahre vergehen, bis man das erste Unternehmen dieser Art durchführte. Glücklicherweise waren die pelagischen Sedimente, die, von gebirgsbildenden Prozessen in den Apenninen emporgehoben, bei Gubbio so klar und deutlich sichtbar waren, wissenschaftlich gesehen «erste Wahl». Gewährten sie doch Hans Peter Luterbacher und Isabella Premoli-Silva eine durchgehende, zusammenhängende Übersicht über die biologische Evolution im Grenzbereich beiderseits der Trennungslinie zwischen Kreide und Tertiär. Das unzerstörte Schichtenprofil blieb vollständig erhalten, weil Gubbio auf dem Meeresboden lag, bis das Gebirge sozusagen mit einem einzigen, gewaltigen Ruck emporgefaltet wurde.

Kontinuität ist allerdings relativ. Haben wir es in Gubbio mit der kontinuierlichen Abfolge der Hinterlassenschaft von Tagen, von Jahren, von Jahrtausenden zu tun? Oder hat man hier die Kontinuität in Einheiten von Jahrmillionen zu messen?

Sedimentationsbefunde, welche die Ablagerungen einzelner Tage anzeigen, werden immer seltener. Holländische Naturwissenschaftler, die Sandablagerungen an Prielen im Wattenmeer untersuchten, entdeckten dort eine tägliche Sedimentation, die bestimmte monatliche Rhythmen sichtbar machte. Beispielsweise kommt es zu dickeren Ablagerungen bei Springfluten, wenn Neu- oder Vollmond herrschen. Dünnere Ablagerungsschichten sind dagegen das Ergebnis von Nippfluten. Man kann an diesen sogenannten Gezeiten-«Bündeln» recht gut die achtundzwanzigtägigen Mondzyklen ablesen. Jedes «Bündel» enthält 28 Ablagerungen der täglich auftretenden Gezeiten. Doch geologische «Tagebücher» sind so gut wie nie erhalten. Meist wurden sie ebenso rasch zerstört, wie sie «geschrieben» wurden.

Unter ungewöhnlichen Umständen erhalten wir vielleicht geologische «Jahrbücher». Die jüngsten Sedimente im Zürichsee beispielsweise sind Warven (Bändertone), Jahr für Jahr angewachsene Ablagerungen von Kalziumkarbonat, welche deutlich die sommerliche Blüte und das winterliche Absterben der Algen im Seewasser spiegeln. Sommer für Sommer werden kleine weiße Kristalle von Kalziumkarbonat ausgefällt, im Winter dagegen lagert sich jedesmal eine papierdünne Schicht von feinsten Überresten ab. Unzerstörte Warven sind daher «Jahrbücher» der Sedimentation. In Binnenseen sind verschiedene Warventypen nicht selten, doch in Ozeanen finden sie sich kaum.

Die unterschiedlichsten Ablagerungen, die bestimmte Sedimentationsrhythmen erkennen lassen, gibt es bei Tiefseesedimenten. Leider ist in vielen Fällen noch nicht klar, worauf der Ablagerungsrhythmus zurückzuführen ist, und auch die Länge der rhythmisch aufeinanderfolgenden Perioden ist in der Regel nicht bekannt.

Die modernen Bemühungen, die Erdgeschichte mit absoluten Daten zu belegen, begannen mit sehr ungenauen Schätzungen. Darwin wagte es, die Mitte der Kreidezeit vor mehr als 300 Millionen Jahren anzusetzen. Er wurde von Lord Kelvin gerügt, dessen ausgeklügelte Berechnungen darauf hinaus liefen, daß die Erde selbst nicht älter als 24 Millionen Jahre sein könne. Wie verlässlich jede Berechnung ist, gleich, ob man sie im Kopf oder mit Hilfe eines Computers vornimmt, hängt von ihrer Prämisse ab. Kelvins Prämisse war falsch. Heute wissen wir: Die Erde ist mindestens 4,5 Milliarden Jahre alt – oder etwa zweihundertmal älter als Kelvin dachte. Die Mitte der Kreidezeit aber lag vor etwa 100 Millionen Jahren.

Darwin irrte sich von Zeit zu Zeit als Geologe, doch lag er mit seiner Schätzung besser als der Physiker Kelvin mit seinen auf den ersten Blick eindrucksvollen, aber oberflächlichen Berechnungen. Zumindest bewegte sich Darwin in der richtigen Größenordnung.

Die «Uhr», die man schließlich anwandte, um die Zeit der Erdgeschichte zu messen, ist die Radioaktivität, und die Datierung vermittels dieser Methode nennt man Radiometrie oder radiometrische Datierung. Diese Technik ergab sich aus der Entdeckung der Isotope. Diese sind Atome eines Elementes, welche die gleiche Anzahl von Protonen und Elektronen haben,

sich jedoch in der Anzahl ihrer Neutronen von anderen Atomen desselben Elementes unterscheiden.

William Prout hatte 1819 argumentiert, die Atomgewichte chemischer Elemente sollten ganze Zahlen sein. Dieses Argument schien überzeugend zu sein, weil das Gewicht eines Atoms in seinen Kernpartikeln, den Neutronen und Protonen liegt, von denen jeder eine Einheit der Gesamtmasse des Atoms bildet (die Masse eines Elektrons ist, von der Praxis her gesehen, gleich Null). Also sollte ein Element, dessen Atom zwei Kernpartikel hat, das Atomgewicht zwei besitzen, ein Atom mit drei Nuklearkpartikeln entsprechend das Atomgewicht drei. Das ist alles sehr einfach. Doch als Studenten mußten wir bei unseren Chemiekursen Berechnungen über die Verbindungen der Natriumchloride anstellen, und dies war eine Quälerei, weil Chlor ein Atomgewicht von 35,453 hat, was eine sehr ungerade Zahl ist.

T. W. Richards von der Harvard-Universität, einer der besten analytischen Chemiker aller Zeiten, bewies 1913 zweifelsfrei, daß die Atomgewichte der Elemente keineswegs ganze Zahlen sind. Aber er war auch bestürzt, als er herausfand, daß ein und dasselbe Element unterschiedliche Atomgewichte haben kann. Radioaktive Elemente werden, wenn sie durch Strahlung zerfallen, in andere Elemente umgewandelt. So entsteht durch den radioaktiven Zerfall von Uran Blei. Richards entdeckte, daß auf diese Weise entstandenes Blei ein anderes Atomgewicht besitzt als gewöhnliches Blei. Diese Ergebnisse verblüfften Richards, doch ein junger, britischer Chemiker, Frederick Soddy, schlug eine brillante Lösung vor: Ein chemisches Element besteht nicht nur aus einer Art von Atomen, sondern stellt eine Mischung von zwei oder mehr Isotopen dar.

Das Wort Isotop ist ein aus griechischen Elementen zusammengesetztes Kunstwort, das die Bedeutung «gleiche Stelle» hat. Diese «Stelle» ist der Platz im periodischen System der chemischen Elemente, dessen Tafeln überall auf der Welt die Wände chemischer Laboratorien schmücken. Jede dieser Positionen ist für ein chemisches Element reserviert, das die gleiche Anzahl von Protonen und Elektronen besitzt. Sie gilt für zwei oder mehr Isotope eines Elements, die zwar alle die gleiche Anzahl von Protonen und Elektronen, jedoch verschiedene Zahlen von Neutronen aufweisen. So haben beispielsweise alle Chloratome in ihrem Kern 17 Protonen, doch eines der Isotope dieses Elementes besitzt 18 Neutronen, so daß es das Atomgewicht 35 hat, wogegen ein anderes Isotop mit 20 Neutronen das Atomgewicht 37 aufweist.

Mit anderen Worten: Chlor nimmt im «periodischen System der Elemente» die Position 17 ein. Dies gilt für beide Isotope: für Chlor 35 ebenso wie für Chlor 37. In der Regel aber ist Chlor eine Mischung beider Isotope. Es besteht im Normalfall zu 75,77% aus Chlor 35 und zu 24,23% aus Chlor 37. Da man bei der Bestimmung der «Massenzahl» (des «Atomgewichts») von dieser Mischung ausgehen und das anteilige Verhältnis beider Isotope berücksichtigen muß, ergibt sich für Chlor insgesamt das «Atomgewicht» 35,453 – und dies ist die unangenehme Zahl, mit der wir uns bei unseren Berechnungen abquälten, bevor der Computer erfunden wurde.

Chlor 35 und Chlor 37 sind stabile Isotope. Sie bleiben in alle Ewigkeit, was sie sind. Anders verhält es sich beim Uran. Dessen drei in der Natur vorkommende Isotope – Uran 238, Uran 235 und Uran 234 – sind instabil, denn sie zerfallen radioaktiv. Die neuen Atome, die sich beim Zerfall solcher radioaktiver Isotope bilden, bezeichnet man als «Tochter-» oder «Zerfallsprodukte». Uran 234 und Uran 238 zerfallen in das «Tochterprodukt» Blei 206, wogegen aus Uran 235 Blei 207 entsteht. Gewöhnliches Blei enthält nicht nur Blei 206 und 207, sondern auch Blei 204 und 208. Sein Atomgewicht unterscheidet sich also von dem Blei, das allein durch den radioaktiven Zerfall des Urans entsteht. Kein Wunder, daß Richards verblüfft war.

Mineralien im Felsgestein sind nicht immer die soliden, beständigen Substanzen, die wir vor Augen haben, wenn wir an Quarz oder Blei denken. Irgendwann bildeten sie vielleicht innerhalb der geschmolzenen Gesteinsmasse Kristalle oder wurden aus wässrigen Lösungen ausgefällt. Wenn ein Mineral kristallisiert, kann ein radioaktives Element – wie zum Beispiel Uran – zum Bestandteil seiner chemischen Zusammensetzung werden. Wenn dieses radioaktive Element aber dann im Laufe der Zeit zerfällt, häuft sich innerhalb der kristallinen Struktur des Minerals, zu dem es ursprünglich nicht gehörte, sein «Tochterelement» an. Deshalb hängt in jedem Mineral, das ein radioaktives Element enthält, die Menge der radioaktiven Isotope im Vergleich zur Menge ihrer «Tochter-» oder Zerfallsprodukte von der Zeit ab, die das Element zu seinem Verfall zur Verfügung hatte, seit sich das Mineral kristallisierte. So sammeln sich im Laufe der Zeit immer größere Mengen des «Tochterelements» an – im Fall des Urans also immer größere Mengen Blei. Die Zeit, in der das «Mutterelement» um die Hälfte seiner Masse zerfällt, bezeichnet man als «Halbwertszeit» des sich verstrahlenden Isotops. Uran 238 hat eine Halbwertszeit von etwa 4 Milliarden Jahren. Weil dies nur etwas weniger als das Alter der Erde ist, ist fast die Hälfte alles Urans 238, das es gab, als vor 4,5 Milliarden Jahren die Erde entstand, noch vorhanden. Die andere Hälfte wurde zu Blei 206. In weiteren 4 Milliarden Jahren wird wiederum die Hälfte der jetzt vorhandenen Substanz von Uran 238 zu Blei 206 zerfallen sein. Dann wird das Verhältnis von Uran 238 zu Blei 206 ein Viertel zu drei Vierteln betragen. Die Verhältniszahl des Uranisotops zu seinem durch Zerfall entstandenen «Tochterisotop» Blei in einem Mineral gibt mithin das radiometrische Alter der Substanz an. Ähnlich verhält es sich mit Kalium 40. Kalium 40 läßt bei seinem Zerfall unter anderem das Edelgas Argon 40 entstehen. Das Verhältnis von Kalium 40 zu Argon 40 in einem Mineral sagt also etwas über das Alter des Minerals aus.

Welches Isotop zum Zwecke einer Analyse Verwendung findet, hängt davon ab, welches radioaktive Element besonders reichlich in einer Gesteinsprobe enthalten ist. Gewöhnlich bedient man sich des Verhältnisses von Kalium zu Argon, um aus Sedimenten bestehendes Felsgestein zu datieren, das kaliumführenden Glaukonit enthält – ein nicht seltenes sedimentäres Mineral, das sich aus Meerwasser herauskristallisiert. Die gleiche Methode benutzt man, um Felsen vulkanischen Ursprungs zu datieren, die in eine

Sedimentenabfolge eingebettet sind, weil sie kaliumhaltigen Glimmer enthalten.

Die quantitative Analyse der Isotope wird mit einem Massenspektrographen vorgenommen. Wie der Name sagt, sondert dieses Gerät Isotope nach ihrer Masse – beziehungsweise ihrem Atomgewicht – aus. Dies geschieht, indem der Massenspektrograph sie gegen ein elektrisches oder magnetisches Feld schleudert. Der Vergleich ist zwar etwas plump, aber man kann dies so sehen: Die leichteren Isotope verhalten sich bei diesem Prozeß etwas «agiler» als die schwereren und werden deshalb vom Magnetfeld weiter abgelenkt.

Auf diese Weise werden Isotope mit verschiedenen Massenzahlen voneinander geschieden und – jeweils einzeln – gesammelt, so daß man sie zählen kann. Seit seiner Erfindung im Jahre 1918 wurde der Massenspektrograph immer weiter verbessert, so daß heute ein paar Mikrogramm einer Materialprobe genügen, um zum Zwecke der radiometrischen Datierung eine genaue Isotopenanalyse vorzunehmen.

Allerdings ist «genau» ein relativer Begriff. Die Dosierung, die genau genug ist, damit ein Kuchen perfekt gelingt, reicht in ihrer «Genauigkeit» auch nicht annähernd aus, um eine perfekte chemische Analyse durchzuführen. Genauigkeit bei wissenschaftlichen Untersuchungen ist ein ganz anderer Begriff als beim Kuchenbacken. Arthur Holmes, ein Pionier auf diesem Gebiet, erstellte die erste mit Zahlen versehene Zeittafel für die geologischen Ären und Perioden. Auch Holmes' Zahlenwerk wurde seit dessen erster Veröffentlichung in den vierziger Jahren verbessert; allerdings gehen diese Verbesserungen noch nicht sehr weit. Beispielsweise setzte Holmes das Ende der Kreidezeit vor 70 Millionen Jahren an. Die heute allgemein akzeptierte Zahl ist dagegen 65 Millionen Jahre. Demnach wurde das Alter des Felsgesteins, das so alt ist wie die pelagischen (ozeanischen) Sedimente des Grenzbereichs zwischen Kreide und Tertiär bei Gubbio, nur um die Größenordnung einiger weniger Jahrmillionen reduziert, so daß man heute diesen Grenzbereich ziemlich genau auf 65 Millionen Jahre vor der Gegenwart datieren kann. Die Zeitspanne, deren Eckdaten vom untersten und obersten Niveau einer Sedimentschicht repräsentiert werden, läßt sich genauer bestimmen, wenn wir die Geschwindigkeit kennen, mit der die Sedimentation stattfand. Als Isabella Premoli-Silva und Hans Peter Luterbacher mit ihren Untersuchungen begannen, waren schon zahlreiche Sedimentschichten oder eingesprengte vulkanische Gesteine in den Sequenzen der Kreidezeit und des Tertiärs mit Hilfe radiometrischer Methoden datiert worden. Die Zeitspanne zwischen zwei radiometrisch datierten Schichten ist die Altersdifferenz zwischen den oberen und unteren Ablagerungen. Die durchschnittliche Sedimentationsgeschwindigkeit ermittelt man, indem man die gemessene Mächtigkeit des Sediments zwischen den darunter- und darüberliegenden Schichten durch die zwischen beiden verstrichene Zeit teilt. Nach dieser Methode fanden Geologen heraus, daß sich pelagische Kalkgesteine gewöhnlich mit einem Tempo von einigen wenigen Zentimetern pro Jahrtausend ablagern,

pelagischer Ton dagegen mit einer Rate von etwa einem Millimeter pro Jahrtausend. Das Schichtenprofil bei Gubbio zeigte, daß die kreidezeitlichen *Foraminiferen* in der Zeitspanne ausgestorben sind, die der ein Zentimeter dicke «Grenzton» repräsentiert. Wurde dieser Ton in einer normalen Rate in einem offenen Meer abgelagert, dürfen wir daraus schließen, daß die kreidezeitlichen Faunen innerhalb eines Zeitraumes von etwa zehntausend Jahren ausstarben, wenn wir auch nicht ganz sicher zu sagen vermögen, ob dies genau vor 65 Millionen Jahren oder ein paar Jahrmillionen früher oder später stattfand.

Luterbacher und Isabella Premoli-Silva vermuteten, daß das Aussterben der alten und das Auftauchen der neuen Arten ebenso plötzlich verlief. Allerdings waren sie nicht ganz sicher, ob es nicht im sogenannten «Grenzton» bei Gubbio doch die eine oder andere kleine Lücke gäbe. Auch die Bewegung des Wassers über dem Tiefseeboden kann zu einer Erosion der Meeressedimente führen, wie die beiden Forscher im Grenzbereich zwischen Kreide und Tertiär in Norditalien festgestellt hatten. Tatsächlich fehlen bei einer Anzahl von Fundstätten unweit von Gubbio einige der obersten Foraminiferenzonen der Kreidezeit bzw. der untersten Zonen des Tertiärs. Wenn nur ein Meter Ton durch Erosion abgetragen wurde, so konnte dies bedeuten, daß das Profil eine Lücke von einer Million Jahre aufweist. Dennoch hatte die radiometrische Datierung der verschiedenen kreidezeitlichen und tertiären Formationen bis 1960 zumindest erbracht, daß es zwischen den letzten kreidezeitlichen und den ersten tertiären *Foraminiferen* zumindest keine Lücke gab, die so groß war, daß man berechtigt wäre, von einem «Abgrund» oder einer «Kluft» zu sprechen. Die Kreidezeit endete irgendwann vor weniger als 70 Millionen Jahren, und das Tertiär begann mehr als 60 Millionen Jahre von der Gegenwart. Ein Bruch in dem Belegmaterial, wenn es ihn denn überhaupt gab, konnte also nicht mehr als ein paar Millionen Jahre betragen haben.

Sowohl die Dinosaurier als auch das kreidezeitliche Plankton starben am Ende der Kreidezeit. Das Ende der Kreidezeit ist sogar durch ihr Aussterben fixiert worden. Aber starben Dinosaurier und Plankton wirklich gleichzeitig aus? Diese Frage war nicht leicht zu beantworten, weil Dinosaurier und Plankton verschiedene Lebensräume innehatten. Die radiometrischen Altersangaben für Sedimente, welche an verschiedenen Örtlichkeiten die Reste der letzten Exemplare dieser Lebewesen an Land und in den Ozeanen bargen, rangieren zwischen 63 und 67 Millionen Jahren. Dieser Spielraum läßt sich auf verschiedene Weise interpretieren: Entweder gibt es tatsächlich Unterschiede zwischen den verschiedenen Plätzen, wo das Aussterben kreidezeitlicher Lebewesen untersucht wurde, oder die Diskrepanz ist auf Unzulänglichkeiten des Meßverfahrens zurückzuführen.

Starben also die Dinosaurier wirklich zur selben Zeit wie das Plankton, starben sie während desselben Jahrtausends, als sich steriler Staub am Meeresboden ablagerte, der den «Grenzton» bei Gubbio bildete?

C-29-R und die Magnetostratigraphie

Bei dem Terminus C-29-R handelt es sich nicht um den Code für einen Geheimagenten oder um die Bezeichnung für eine geheime Strategie beim Fußballspiel. Es ist die Abkürzung für *Chron-Cenozoic-29-reversed*, die magnetostratigraphische Epoche, die für die Frage entscheidend geworden ist, ob die Dinosaurier und die alten *Foraminiferen* zur selben Zeit ausstarben.

Stratigraphie (wörtlich: «Schichtenbeschreibung») ist die Wissenschaft von den *strata* («Schichten»), ihrer *Sequenz* (Abfolge) sowie ihren Beziehungen zueinander. Magnetostratigraphie ist ein neuer Zweig dieser Wissenschaft, der das Alter von Schichten durch Untersuchung der Lage von Magnetitstückchen bestimmt, die in das Felsgestein «eingefroren» sind, als es «ausgelegt wurde» oder kristallisierte.

Daß es möglich wäre, Felsgestein durch die Untersuchung seiner magnetischen Eigenschaften zu datieren, erfuhr ich erstmals 1953 in einem Seminar bei Keith Runcorn. Damals waren Runcorn als neugebackener britischer Doktor und ich als chinesischer Doktorand an der UCLA (*University of California at Los Angeles*). Eigentlich nahm ich an Runcorns Lehrveranstaltung gar nicht teil, weil ich eine persönliche Abneigung hatte. Der Grund war ganz einfach: Runcorn und ich – wir hatten beide mit Gesteinsproben zu arbeiten, verfügten aber in unserem Labor über nur eine einzige große Steinsäge. Der «Eindringling» aus England hatte Physik studiert und nur geringe Kenntnisse im Zersägen von Felsen erworben. Im Vergleich zu ihm waren wir Geologiestudenten natürlich Experten. Runcorn erhielt das Privileg, die Säge an den Abenden zu benutzen, und leider fanden wir dann mehr als einmal am nächsten Morgen ein zerbrochenes Sägeblatt und hatten das «Vergnügen», es durch ein neues zu ersetzen. Außerdem war da noch meine Arroganz. Als junger, rotzfrecher Doktorand hielt ich meine eigenen Studien für das einzige, was wissenschaftlich zählte. Und ich war der Ansicht, wer nicht richtig mit einer Gesteinsäge umgehen könne, habe uns nichts zu erzählen. Ich irrte mich. Runcorns Seminar, dies erfuhr ich von einem Kommilitonen, der es besuchte, handelte diesen Tag von dem remanenten natürlichen Magnetismus von Felsgestein – ein für Geologen eminent wichtiges Thema.

Alle Felsgesteine enthalten auch magnetische Mineralien wie Magnetit, jenem Material, aus dem die ersten Kompaßnadeln bestanden. Diese Miniaturmagneten orientieren sich selbst an den Feldlinien des Erdmagnetfeldes, wenn sie sich frei bewegen können. Ebenso richten sich Eisenspäne nach den Feldlinien eines Magnetstabes aus. Magnetitstückchen orientieren sich in

einem Sediment, während es entsteht, oder in geschmolzenem Gestein, das langsam auskühlt und erhärtet. Normalerweise deutet ihr nach Norden weisender Pol auch tatsächlich auf den magnetischen Nordpol irgendwo in der Arktis, und weil die Erde rund ist, hat das nach Norden weisende Ende eines Magnets stets eine Abweichung nach unten, ihr südliches Ende dagegen eine entsprechende Abweichung nach oben. Den Winkel dieser Abweichung bezeichnet man als magnetische Inklination. Instrumente, die eigens für die Messung der Intensität und Orientierung dieses remanenten natürlichen Magnetismus konstruiert worden sind, wurden erstmals zum Zweck der Erforschung vulkanischen Gesteins verwendet. Schon 1909 führte ein französischer Geophysiker, Bernhard Bruhnes, ein Forschungsprogramm durch, um in Zentralfrankreich, und zwar in dem Tafelland südlich der Loire, den natürlichen remanenten Magnetismus von Basaltgesteinen zu untersuchen. Die meisten seiner Proben zeigten die von ihm erwarteten Eigenschaften, doch bei einigen entdeckte er zu seiner Überraschung ein seltsames magnetisches «Verhalten»: Die nach Norden weisenden Enden der Miniaturmagneten in diesem Felsgestein deuteten nicht nach Norden, sondern nach Süden, und sie wiesen nach oben, statt nach unten. Sie waren also völlig entgegengesetzt zum heutigen Feldlinienverlauf orientiert.

Etwa zwei Jahrzehnte später, im Jahre 1928, unternahm Motonari Matuyama ähnliche Messungen an vulkanischem Felsgestein, das sich während der letzten zwei Millionen Jahre in Japan gebildet hatte, und entdeckte abermals diese merkwürdige Umpolung. Außerdem fand er heraus, daß diese Polumkehrung durchgehend bei einer Gruppe älterer Basalte auftrat, wogegen die jüngeren alle so gepolt waren, wie die Feldlinien des Erdmagnetismus noch heute verlaufen. Dies brachte ihn auf den kühnen Gedanken, daß es einst einen Polsprung gegeben haben mußte: Irgendwann muß der magnetische Nordpol nahe der Antarktis gelegen haben, der magnetische Südpol dagegen unweit der Arktis. Nach Matuyamas Schätzungen mußte dieser Polsprung im Quartär stattgefunden haben, vielleicht vor ein paar Millionen Jahren. Wenn Matuyama recht hätte, betonte Runcorn, so besäßen die Geologen eine neue Methode, um Felsgestein, das sich vor dem Polsprung gebildet hatte, von solchem zu unterscheiden, das nachher entstanden war. Wahrscheinlich hätte ich mit beißendem Spott Matuyamas Glaubwürdigkeit in Zweifel gezogen, wenn ich in seine Übung gegangen wäre. Der Gedanke, daß das Erdmagnetfeld auf dem Kopf gestanden haben soll, überstieg alle meine Vorstellungskraft.

Nicht viele Wissenschaftler glaubten an Matuyamas Erklärung, nicht einmal seine Landsleute. Seiya Uyeda, damals ein junger Geologe frisch von der Universität, wies die verrückte Idee nicht nur zurück, sondern machte sich auch daran, eine glaubwürdigere Erklärung für die unbezweifelbare Tatsache der Magnetfeld-Umkehrung zu finden. Beim Experimentieren in seinem Labor brachte er es zuwege, daß Magnetismus sich von selbst umkehrte. 1958 konnte er demonstrieren, daß man Felsgestein so manipulieren kann, daß es unter bestimmten Voraussetzungen eine «auf dem Kopf stehen-

de» magnetische Polarität entwickelt. Das war schön, aber die Frage blieb offen, ob die umgekehrte Polarität in den vulkanischen Materialproben Bruhnes und Matuyamas von einer physikalischen «Sonderbehandlung» stammte, oder ob sich nicht das Erdmagnetfeld in der Vergangenheit doch einmal um 180 Grad gedreht hatte.

Es gab eine Methode, die beiden Alternativen zu überprüfen. Wenn Matuyama recht hätte, müßten sich alle magnetischen Felsgesteine mit auf dem Kopf stehenden Magnetismus in einer Epoche der Erdgeschichte gebildet haben, in der das Erdmagnetfeld total umgekippt war, und dürften daher gleichalt sein. Wie alt ein Gestein ist, kann man durch radiometrische Datierung bestimmen. Ob es also jemals eine solche Epoche gab, in der das Erdmagnetfeld umgekippt war, kann man durch die Altersbestimmung der vulkanischen Gesteine herausfinden.

Vulkanische Gesteine enthalten radioaktives Kalium. Bis 1960 war die radiometrische Datierung soweit verfeinert worden, daß Forschungsteams in Kalifornien und Australien recht verlässliche Zahlenangaben über das Alter junger Basalte aufzustellen begannen. Ihre Daten bestätigten Matuyamas Vermutung. Alle Basaltfelsen mit umgekehrter Polarität stammten von Vulkanausbrüchen des Känozoikums, und zwar des späten Pliozäns und des frühen Pleistozäns vor etwa 2,4–0,7 Millionen Jahren. Dies sprach für die Wahrscheinlichkeit, daß die Magnetpole damals tatsächlich ihre Positionen vertauscht hatten. Als sogenannte magnetostratigraphische Epoche erhielt der fragliche Zeitraum den Namen des Wissenschaftlers, der das Phänomen entdeckt hatte, und wurde folglich Matuyama-Epoche genannt. Seit dieser Matuyama-Epoche blieb das Erdmagnetfeld so gepolt, wie es heute «normal» ist. Die bisher etwa 700 000 Jahre alte magnetostratigraphische Neuzeit erhielt den Namen des französischen Geophysikers Bruhnes. So waren, weniger als ein Jahrzehnt nach Runcorns Seminar, die Geologen selbst auf Gegenkurs gegangen. Matuyamas «verrückte Idee» hatte sich als zutreffend erwiesen und sogar zur formellen Benennung zweier neuer magnetostratigraphischer Epochen geführt.

Wie sich herausstellte, blieb es nicht bei der Entdeckung dieser beiden Epochen. Heute wissen wir, daß das Erdmagnetfeld instabil war. In vergangenen Phasen der Erdgeschichte sind die Magnetpole der Erde wiederholt «gesprungen», bzw. ist das Erdmagnetfeld mehrmals «gekippt». Nord- und Südpol haben immer wieder zwischen den beiden Zuständen «normal» und «revers» (umgekehrt) gewechselt. Solche Polaritätsumkehrungen gab es in unregelmäßigen Zeitabständen. Jeder Polsprung brauchte Jahrtausende, um komplett zu sein. Auch vor der nach Bruhnes benannten erdmagnetischen Gegenwart gab es viele Schichten mit «normal» polarisiertem Felsgestein, ebenso wie es auch noch vor der Matuyama-Epoche zahlreiche Schichten mit umgekehrter Polarität gab.

Rein gefühlsmäßig ist der Gedanke nicht sonderlich sympathisch. Aber nur Laien könnten annehmen, daß das Erdmagnetfeld durch einen riesigen Magneten aus solidem Material hervorgerufen wird, der in unserem Planeten

verborgen ist. Einen solchen Magneten umzupolen, wäre physikalisch unmöglich. Tatsächlich kann aber auch kein Feststoffmagnet die Ursache des Erdmagnetfeldes sein, weil sämtliche Magneten dieser Art ihren Magnetismus bei den hohen Temperaturen verlieren würden, die im Innern des Planeten herrschen. Unser Magnetfeld ist elektromagnetisch. Das Feld wird durch den Fluß geladener Partikel im geschmolzenen Eisenkern der Erde erzeugt, wie ein Magnetfeld durch den Strom, der durch eine Drahtspirale fließt, erzeugt wird. Somit ist der Erdkern ein riesiger Dynamo. Und weil die Bewegung des flüssigen Kerns von der Umdrehung des Planeten abhängt, fiel die Position der magnetischen Pole stets mehr oder weniger mit der der geographischen Pole zusammen. Berechnungen haben jedoch gezeigt, daß zufällige Bewegungen innerhalb des flüssigen Kerns, Turbulenzen, die an Zykclone in der Atmosphäre erinnern, zu einem Umkippen des Erdmagnetfeldes führen können, wann immer eine kritische Konfiguration erreicht ist. Polaritätsumkehrungen im Erdmagnetfeld sind daher eine physikalische Realität, kein übernatürliches Wunder.

Während noch in den Laboratorien analysiert wurde, wie die den kontinentalen Gesteinsschichten entnommenen Proben gepolt waren, suchten Geophysiker der *Scripps Institution of Oceanography* zu Schiff nach Spuren von remanentem Magnetismus auf dem Meeresboden des Pazifik. Als sie ihre Daten in die Karte eintrugen, fanden sie eine weitere seltsame Anomalie: In dem Bereich, den sie mit ihrem an dem Schiff vertäuten Magnetometer untersuchten, schwankte die Intensität des Magnetfeldes mit charakteristischer Regelmäßigkeit. Schmale Meeresbodenstreifen mit hoher magnetischer Intensität wechselten mit Streifen von sehr geringer Intensität ab. Die Streifen waren zwischen mehreren Kilometern und etwa 100 Kilometer breit, und ihre Länge betrug sogar Tausende von Kilometern. Schließlich fand man derartige magnetische Streifen in allen Ozeanen der Welt.

Gegen Ende der fünfziger Jahre veröffentlichte das Scripps-Institut seine ersten Magnetfeldkarten, doch die das Problem bearbeitenden Geophysiker, Art Raff und Vic Vacquier, sahen sich außerstande, eine Erklärung zu geben.

Man hätte denken können, daß unter den Streifen mit hoher Intensität unterseeische Massive aus magnetischem Basalt lagen. Doch die Echoloterkundung hatte ergeben, daß kein Zusammenhang zwischen Magnetismus und Topographie bestand. Ein unterseeisches Bergmassiv konnte zu einer Zone hoher, aber auch niedriger Intensität gehören, und gleiches gilt für unterseeische Ebenen. Doch das Rätselraten dauerte nicht lange. Fred Vine, ein Doktorand aus Cambridge, der seine Doktorarbeit begann, nachdem die Scripps-Karten veröffentlicht waren, lieferte die Antwort.

Ich hörte erstmals von Fred Vine, als wir uns beide darum bewarben, das Hauptreferat auf dem 1966 in San Francisco stattfindenden Kongreß der *Geological Society of America* zu halten. Man wählte ihn aus, und er trug der Gesellschaft seine neue, inzwischen berühmt gewordene Theorie der Meeresboden-Ausdehnung (*Seafloor Spreading*) vor. Erneut entging mir damals ein wesentli-

cher Vortrag, weil ich als «Verlierer» voller Enttäuschung war. Wäre ich hingegangen, hätte ich mich damals schon voll und ganz hinter Vines Revolution der Geowissenschaft gestellt, anstatt drei Jahre hinterherzuhinken und mich erst durch meine eigenen Resultate auf die gleichen Ideen bringen zu lassen.

Schließlich lernte ich Vine auch persönlich kennen, als ich ihn als Vorsitzender der Berufungskommission für den geophysikalischen Lehrstuhl nach Zürich eingeladen hatte. Er erzählte mir damals, er sei gewissermaßen auf zwei gedanklichen Geleisen zur Lösung des Magnetismus-Rätsels gelangt. Ausgangspunkt war die 1912 von Alfred Wegener publizierte (und vor allem in den zwanziger Jahren bekanntgewordene) Theorie der Kontinentalverschiebung. Wegener hatte eine ganze Reihe verblüffender Tatsachen zusammengestellt, die sich nur dadurch erklären ließen, daß die Kontinente auseinandergedriftet sein mußten – doch wie konnten Kontinente driften, wenn der gesamte Erdball von einer harten, soliden Kruste umgeben war?

Angeregt von Harry Hess von der Princeton-Universität, betrachtete Vine die Sache unter einem anderen Blickwinkel und fand die Lösung: Die Kontinente konnten nicht driften, und doch bewegten sie sich auseinander, wenn sich der Meeresboden zwischen ihnen ausdehnte. Ständige Eruptionen von Basaltlava längs einer Zentrallinie, der Achse der Meeresboden-Ausdehnung, bildeten von Mal zu Mal Segmente neuen Meeresbodens in der Mitte der Ausbruchszone, die immer mehr die älteren Segmente zu beiden Seiten auseinanderschoben – und mit ihnen die noch weiter entfernten Kontinente am Rande der Ozeane. Die Theorie von Vine wurde inzwischen so gründlich bestätigt, daß das, was sie beschreibt, nämlich die Meeresboden-Ausbreitung, längst in den Rang einer wissenschaftlich erhärteten Tatsache erhoben ist. Sie erklärt nicht nur das anscheinende Auseinanderdriften der Kontinente, sondern auch deren Kollision, die, wie wir heute wissen, zur Auffaltung so riesiger Gebirgszüge wie der Alpen, der Apenninen und der Ketten des Himalaya geführt hat.

Eine zweite Voraussetzung der Theorie Vines war, daß dann, wenn es so etwas wie eine Umpolung des Erdmagnetismus gab, der frisch ausgeworfene Basalt genau die Polarität besaß, die das Erdmagnetfeld zur Entstehungszeit dieses Eruptivgesteins aufwies. Jedes Umschwenken des Magnetismus sollte sich daher in Segmenten am Meeresboden beiderseits der Ausdehnungsachse abzeichnen. Jedes Segment neuen Meeresbodens längs der Achse, das nach einem Umkippen der erdmagnetischen Feldlinien entstand, mußte daher den Zustand widerspiegeln, den das Erdmagnetfeld hatte, als das Segment entstand. Ein Segment aus der Zeit nach einem Polsprung wiese also eine «auf dem Kopf stehende» magnetische Polung auf, im Gegensatz zu anderen Segmenten aus der Zeit vor der Umkehrung. Da der über der Ausdehnungsachse immer wieder neu entstehende Meeresboden die älteren Segmente zu beiden Seiten immer mehr auseinanderdrängt, wird die Anzahl dieser Segmente immer größer. Ganz einfache Arithmetik löst schließlich das Rätsel, warum diese Bodenstreifen sich in ihrer magnetischen Intensität unterscheiden: Diejenigen von ihnen nämlich, die in Zeiten normaler Polari-

tät entstanden, besitzen auch ein normal gepoltes Magnetfeld, das mit seinem eigenen remanenten Magnetismus den normalen Magnetismus der Erde verstärkt. So entstanden die Streifen hoher magnetischer Intensität, welche die Magnetometer der Scripps-Institution nachgewiesen hatten. Segmente umgekehrter Polarität wirken demgegenüber dem heutigen Magnetismus entgegen. Man muß mithin ihren eigenen Magnetismus von dem des heutigen Erdfeldes «abziehen». So ergeben sich Streifen geringer magnetischer Intensität. Die wechselnden Streifen mit hoher und niedriger Feldstärke sind daher einem magnetischen Tonband vergleichbar, das aufeinanderfolgende Umkehrungen des Erdmagnetfeldes gespeichert hat.

Die Theorie geht ferner davon aus, daß die Breite eines magnetischen Streifens der Dauer der jeweiligen Polaritätsepoche entspricht. Wenn die Polarität der Erde über längere Zeit hinweg gleich blieb, entstand ein ziemlich breiter Streifen neuen Meeresbodens, der entsprechend magnetisiert war. Ein solches Segment konnte so breit sein, daß es schließlich geradezu zur «Ruhezone» wurde. Häuften sich dagegen die Polsprünge, so war das Ergebnis eine Reihe schmaler Streifen unterschiedlicher Polung. Unter der Voraussetzung, daß die Ausdehnung des Meeresbodens stets in gleichem Tempo vor sich ging, entspricht die Breite dieser Streifen jeweils der Dauer der Polaritätsepoche, in der sie entstanden.

Als Vine 1963 zusammen mit seinem Doktorvater Drum Matthews seine Gedanken veröffentlichte, hatte man mit Hilfe der radiometrischen Analyse bereits die Dauer der vier jüngsten Polaritätsepochen festgestellt, welche die Gesamtspanne von fünf Millionen Jahren umfassen. Datiert man von der gegenwärtigen Bruhnes-Phase, die seit 0,7 Millionen Jahren besteht, zurück, kommen auf die drei anderen Epochen jeweils 1,7 sowie 0,9 und 1,7 Millionen Jahre. Wenn Vines und Matthews' Theorie zutrifft, müßte das Breitenverhältnis der vier magnetischen Streifen, die der Achse der Meeresboden-Ausdehnung am nächsten sind, 0,7 zu 1,7 zu 0,9 zu 1,7 betragen. Mit den entsprechenden Daten versehen uns die Karten der Scripps-Institution. Vine konnte zeigen, daß das Verhältnis der Streifenbreite genau seinen Vorhersagen entsprach, und daß dieses gleiche Verhältnis sowohl für den Boden des Pazifik als auch den des Atlantik galt. Dieser Befund bestätigte so die Vermutung, daß beide Ozeanböden sich zumindest während der letzten 5 Millionen Jahre gleichmäßig und beständig ausgedehnt hatten.

Doch Vine ging noch einen Schritt weiter. Wenn das Tempo und die Rate der Meeresboden-Ausdehnung tatsächlich *stets* gleich waren, sollten wir, so überlegte er, für jeden Punkt des Ozeanbodens das Alter des dortigen Meeresbodens bestimmen können. Dafür mußte man nur messen, wie weit der betreffende Punkt von der Ausdehnungsachse entfernt war, und die Entfernung durch die Rate der Meeresboden-Ausdehnung dividieren. Beträgt die Ausdehnungsrate beispielsweise 1 cm pro Jahr, so hat der Meeresboden in einer Entfernung von 100 Kilometern ein Alter von 100 Kilometern mal Zentimetern pro Jahr, und dies ergibt 10 Millionen Jahre. Die Aussicht, so zu einer neuen Datierungsmethode zu gelangen, war erregend. Die Breite

jedes Magnetstreifens auf dem Meeresboden, nicht nur der vier allerjüngsten, konnte nun Aussagen darüber machen, wann die Periode der Magnetpol-Umkehrung begonnen hatte und wie lange sie dauerte. Von Meeresböden ausgehend, die bereits vollständig untersucht worden waren, stellten im Jahre 1968 Jim Heirtzler und seine Kollegen am Lamont-Doherty-Laboratorium für Geologie eine magnetostratigraphische Zeittafel auf, die bis zu 80 Millionen Jahre vor die Gegenwart zurückgeht.

Mir entging die Aufregung, die diese großartigen Entdeckungen der marinen Geophysiker hervorriefen. Anfang der sechziger Jahre bestand meine Tätigkeit darin, zu Land nach Öl zu suchen. Nicht genug mit den Fakten vertraut und daher blind für ihre Bedeutung, stand ich abseits und blieb selbstgefällig bei meiner Ansicht, die neuen Hypothesen der Magnetpol-Umkehrung und der Meeresboden-Ausdehnung seien Unsinn.

Doch wie das Schicksal so spielt – 1967 nahm ich eine andere Tätigkeit an und bekam eine Stelle in dem Binnenland Schweiz. Dies jedoch nur, um ein Jahr später zur Teilnahme an einer ozeanographischen Expedition aufgefordert zu werden. Es ging dabei um ein multinationales Forschungsprogramm, das die Bezeichnung *Joint Oceanographical Institutions' Deep Earth Studies* (abgekürzt: *JOIDES*) trug. Dieses erste Tiefseeboden-Forschungsprogramm war die dritte Expedition eines jüngst gestarteten Tiefsee-Bohrprojektes, dessen allgemeine Aufgabe darin bestand, die Tiefseebereiche der Ozeane zu erforschen. Die Expedition, an der ich teilnahm, hatte die besondere Aufgabe, die Theorien von Vine und Matthews zu überprüfen.

Für die Durchführung unseres Vorhabens hatten wir im Südatlantik Bohrungen vorzunehmen, die 200, 420, 500, 700, 1000 und 1300 Kilometer von der Achse der Meeresboden-Ausdehnung entfernt waren, die man im Atlantik «Mittelatlantischen Rücken» nennt. Die Ausbreitungsrate des Meeresbodens betrug in diesem Teil des Atlantik während der letzten 5 Millionen Jahre 2 Zentimeter pro Jahr. Unter Anwendung der mir etwas zu einfach erscheinenden Formel Entfernung mal Rate mußten die Böden an den Bohrstellen 10, 21, 25, 35, 37, 50 und 65 Millionen Jahre alt sein. Nach zwei Monaten des Bohrens und grober Voruntersuchungen des erbohrten Materials an Bord hatten wir die ersten, mit anderen Datierungsmethoden gewonnenen Vergleichswerte. Demnach waren die Böden 9, 24, 26, 33, 40, 49 und 67 Millionen Jahre alt. Die Übereinstimmung war verblüffend, meine Skepsis total erschüttert.

Ich gab nicht gern zu, daß ich mit meinem Urteil falsch gelegen hatte, doch mir blieb keine Wahl. Eine wissenschaftliche Theorie kann Voraussagen machen und daran gemessen werden, ob diese zutreffen. Vine und Matthews hatten etwas vorausgesagt, und ihre Vorhersage war auf erstaunliche Weise wahr geworden.

Innerhalb eines Jahres hatten die Resultate von Tiefseebohrungen die Gültigkeit der magnetostratigraphischen Zeittafel bestätigt. Die nächste Stufe bestand darin zu untersuchen, ob die Chronologie der Magnetfeld-Umkehrungen, die aus der horizontalen Meeresboden-Ausdehnung abgeleitet wur-

de, mit der Chronologie übereinstimmte, die aus den radiometrisch datierten fossilen Zonen in vertikalen Schichtenabfolgen des aus Sedimenten bestehenden Felsgesteins abgeleitet wurde.

Dieser zweite Test machte größere Anstrengungen nötig. Nur Sedimente und aus Sedimenten bestehende Felsen enthalten genügend Fossilien für eine genaue Datierung durch Paläontologen, doch ihr Magnetismus gibt uns weniger klare Signale als der remanente Magnetismus in den vulkanischen Gesteinen, in denen zuerst Umpolungen des Erdmagnetfeldes entdeckt wurden. Man mußte hochempfindliche Geräte erfinden, um ihren eher versteckten Magnetismus aufzuspüren. Außerdem mußte die Technik der Probenentnahme verbessert werden. Tiefseebohrkerne waren damals primitiv, oft lieferten sie nur zerbrochene oder unvollständige Proben pelagischer Sedimente. Wir erzielten keinerlei Fortschritte, bis eine neue Technik entwickelt worden war, die es uns ermöglichte, komplette, unversehrte Proben aus Bohrlöchern im Meeresboden zu gewinnen.

Tatsächlich dauerte es noch dreizehn Jahre, bis die Technik entwickelt war, um Heitzlers «horizontale» Zeittafel zu verifizieren, indem man sie mit der Chronologie vertikal geschichteter Sedimente verglich. Endlich, im Jahre 1980, leitete ich die dreiundsiebzigste Bohrexpedition des Tiefsee-Bohrprojektes, die wiederum in den Südatlantik führte, um dort eine Chronologie aus dem Boden zu bohren. Wir fanden, daß die Polaritätsepochen, die sich im remanenten Magnetismus in Sedimenten abzeichneten, genau mit den Polaritätsepochen in den magnetischen Streifen auf dem Meeresboden übereinstimmten. Beide «Dateien» enthielten die Geschichte des wechselnden Magnetfeldes der Erde.

So kann man den Terminus C-29-R folgendermaßen erklären: C-29-R ist die Kurzform für *Chron-Cenozoic-29-R*, das heißt: die Zeit der umgekehrten Polstellung während der 29. magnetischen Epoche des Känozoikums. Jede magnetostratigraphische Epoche wird als Chron bezeichnet. Jedes Chron enthält eine Ziffer entsprechend seiner Position in der Abfolge dieser Epochen. C steht für *cenozoic* (känozoisch), weil dieses «Set» von Chronen vom jüngsten seiner Art (Känozoikum 1), das den nach Bruhnes und Matuyama benannten magnetostratigraphischen Epochen entspricht, aufwärts gezählt wird. Hinzugefügt werden die Buchstaben N (für «normal») und R (reversed [«umgekehrt»]). So wird die Bruhnes-Epoche zu C-1-N, die Epoche Matuyamas aber C-1-R. *Chron-Cenozoic-2-N* (oder: C-2-N) ist die nächstältere Epoche normaler Polarität auf dem Meeresboden, in der das Erdmagnetfeld also so gepolt war, wie es heute ist. Sämtliche Chronen, welche die Bezeichnung N tragen, entsprechen den Streifen hoher magnetischer Intensität auf dem Meeresboden, die sich durchweg in Zeiten normaler Polung gebildet haben. Zwischen ihnen liegen die Streifen mit niedriger Intensität. Sie entstanden in den Epochen umgekehrter Polarität und tragen daher den Buchstaben R.

Ein Chron in einer vertikalen Sediment-Abfolge zu identifizieren, ist schwieriger als sein Nachweis in einer horizontalen Streifen-Abfolge auf dem Meeresboden. Nirgendwo finden wir eine durchgehende, kontinuierliche

Sequenz vom heutigen Tage bis zurück zur Dinosaurierzeit. Deshalb können wir nicht einfach von oben an zu zählen beginnen, bis wir bei der gewünschten Schicht angelangt sind. Wir müssen uns mit fragmentarischen Informationen abfinden, um das, was wir suchen, innerhalb einer Sequenz zu finden, die nicht vollständig ist. Zum Glück fanden die Polsprünge in unregelmäßigen Intervallen statt, so daß sich die Signale wie ein Morse-Code lesen. Beginnt man beispielsweise die Meeresbodenstreifen «von außen» zur Ausbreitungsachse hin zu lesen und fängt mit *Chron-Cenozoic-25* an, so ist die Breite des magnetischen Streifens C-25-N nur gering, C-25-R dagegen ist breit. Geht man nach außen hin weiter, so sind die beiden Streifen C-26 schmal und breit, die C-27-Streifen dagegen sind beide schmal. C-28 hat die Weiten «mittel» und «schmal», die C-29-Streifen sind schmal und mittel usw. Die ihnen entsprechenden magnetostratigraphischen Chronen sind von entsprechender Dauer. *Chron-Cenozoic-25-normal* müßte von kurzer, C-25-R dagegen von langer Dauer sein, und von dort bis zu C-29 ist die Reihenfolge kurz, lang, kurz, lang, kurz, kurz, mittel, kurz; das Ganze endet mit kurz, mittel.

Tatsächlich ist die Information viel präziser, als sich durch die Adjektive «breit», «schmal», «lang» und «kurz» ausdrücken läßt, weil sich die Breite der magnetischen Streifen genau messen und in Zahlen wiedergeben läßt. Wenn wir schwarze und weiße Striche unterschiedlicher Stärke verwenden, um die Phasen normaler und umgekehrter Magnetfeld-Polarität zu bezeichnen, so entsteht ein Muster, das sehr stark dem computerlesbaren Strichcode ähnelt, mit dem heute alle fertigverpackten Handelswaren versehen sind. Computer haben keinerlei Schwierigkeit, die Informationen zu lesen, die in solchen Codes gespeichert sind. Dies gilt auch für das Streifenmuster auf dem Meeresboden, und Geologen verstehen es, diese Muster der Magnetostratigraphie zu lesen. Schon die erste Südatlantik-Expedition, an der ich teilnahm, erbrachte 1969 Anhaltspunkte dafür, daß die letzten mesozoischen Sedimente wahrscheinlich während der Epoche *Chron-Cenozoic-29-reversed* (C-29-R) abgelagert wurden. Unter Verwendung unseres Kürzels konnten wir damals mit aller gebotenen Vorsicht die Aussage wagen, daß das Mesozoikum während der Epoche C-29-R endete.

Im Jahre 1979, fünfzehn Jahre, nachdem die Paläontologen in Gubbio den Horizont des kreidezeitlichen Sterbens festgelegt hatten, schlossen sich unter anderem der Geophysiker Bill Lowrie und der Geologe Walter Alvarez der Paläontologin Premoli-Silva und ihrem Team an, um an der Stelle, wo dieses Team seine Foraminiferen-Studien erarbeitet hatte, die Magnetostratigraphie der Schichtenfolge festzustellen. Die Gruppe fand die Grenze zwischen der Kreide und dem Tertiär, die Stelle, wo auf das an *Foraminiferen* reiche Kalkgestein der nahezu sterile «Grenzton» folgte, in der Magnetfeld-epoche *Chron-Cenozoic-29-reversed* (C-29-R). Dies bestätigte die sehr vorsichtige Folgerung, die während der ersten Südatlantik-Expedition unser Bohrtteam traf. Doch wie kann man den Zusammenhang zwischen C-29-R, dessen Alter auf der Grundlage der Meeresboden-Ausbreitungstheorie errechnet

wurde, und dem Alter der Sedimente, die paläontologische Anhaltspunkte für ein Massensterben erbracht hatten und radiometrisch datiert wurden, bestätigen?

Der magnetisch nicht sehr intensive Streifen *Chron-Cenozoic-29-reversed* lag 1300 km vom Mittelatlantischen Rücken entfernt. Davon ausgehend, daß sich in diesem Teil des Atlantik der Meeresboden mit einer Rate von 2 Zentimetern pro Jahr ausbreitete, ergibt sich für C-29-R die Rechnung: 13 Millionen Zentimeter, geteilt durch 2 Zentimeter pro Jahr gleich 65 Millionen Jahre. Die radiometrische Datierung von Schichten vulkanischer Asche unweit der Grenze zwischen Kreide und Tertiär erbrachte Zeitangaben zwischen 63 und 67 Millionen Jahren – plus oder minus 2 Millionen Jahre. Das magnetostratigraphische Alter von 65 Millionen Jahren für diesen Grenzbe-
reich ist eine runde Zahl genau in der Mitte zwischen den radiometrischen Daten. Man hat sich daher genau auf diesen Zeitansatz geeinigt, um das Ende des Mesozoikums und den Beginn des Känozoikums festzusetzen.

Wegen der bei der radiometrischen Datierung auftretenden Ungenauigkeiten läßt sich diese Datierungsmethode nicht zur Messung von Zeitabschnitten heranziehen, die von relativ kurzer Dauer sind und beispielsweise nur wenige Millionen Jahre betragen. Doch die Magnetostratigraphie hat uns mit dem präzisen Maßstab versehen, der uns die Messung von langen Epochen ermöglicht. Denis Kent vom Geologischen Laboratorium Lamont fand, daß C-29-R nicht länger als eine halbe Million Jahre gedauert haben kann. Von der Breite des betreffenden Streifens ausgehend, errechnete Kent für diese Epoche mit ihrer Polumkehrung die genaue Dauer von 470 000 Jahren. Weil die durch den Streifen repräsentierte Zeitspanne dem Zeitraum entspricht, in dem die aus derselben Epoche stammenden Sedimente abgelagert wurden, gaben seine Zahlen die Grenze der Zeit an, in der das Massensterben der Plankton-Lebewesen stattfand, die sich in den aus dem Meere stammenden Sedimenten bei Gubbio finden.

Mit Hilfe einer anderen Berechnungsmethode kann überprüft werden, ob das Massensterben sich auf die gesamte C-29-R-Periode erstreckte oder nur während eines Teils dieser Zeit stattfand. Die umgekehrte (revers) magnetisierte Abfolge C-29-R besteht an der fraglichen Stelle hauptsächlich aus pelagischem Kalkstein und ist etwa 5 Meter dick. Die Sedimentationsrate (das Ablagerungstempo) bewegt sich bei derartigem Kalkgestein in der Größenordnung von einem Zentimeter pro Jahrtausend. Die gesamte Zeitspanne (die man übrigens auch mit Hilfe der Magnetostratigraphie bestimmte), aus der die betreffenden Ablagerungen stammen, betrug also etwa eine halbe Million Jahre. Die Tatsache, daß das «plötzliche» Sterben stattgefunden hatte, zeichnet sich klar in dem 1 cm dicken «Grenzton» ab. Ton lagert sich viel langsamer ab als Kalkstein. Die Sedimentationsrate beträgt nur 1 Millimeter pro Jahrtausend. Den besten Schätzungen zufolge müssen also die marinen Mikrofaunen bei Gubbio während eines Zeitraumes von nur 10 000 Jahren innerhalb von Chron C-29-R ausgestorben sein. Ferner sind wir heute dank der Magnetostratigraphie sicher, daß es bei Gubbio keine große Schichtlücke

gibt. Wenn es denn überhaupt eine gibt, so kann sie keine größere Zeitspanne als ein paar tausend Jahre repräsentieren.

Beschränkte sich auch das Aussterben der Dinosaurier auf den gleichen kurzen Zeitraum? Die Magnetostratigraphie hat es ermöglicht, sich intensiver auf diese Frage zu konzentrieren, obwohl auch sie keine absolut sichere Antwort zu geben vermag.

Das endgültige Aussterben während der Kreidezeit können wir mit Daten belegen. Sie stammen von Sandstein- und Schieferproben, die zwischen Lagen vulkanischer Asche eingebettet waren und die letzten Überreste der Dinosaurier enthalten. Je nach Bohrstelle deutete manche dieser Proben auf ein Aussterben der Dinosaurier vor 67 Millionen Jahren hin, anderen zufolge müssen sie noch vor etwa 63 Millionen Jahren gelebt haben. Immerhin ist das Verfahren der radiometrischen Datierung mit so vielen Ungenauigkeiten behaftet, daß dies nicht unbedingt bedeuten muß, daß die Dinosaurier einen langen, fünf Millionen Jahre währenden Todeskampf ausfochten und an verschiedenen Stellen der Welt zu verschiedenen Zeiten untergingen. Eher spiegeln sich hier verfahrensbedingte Ungenauigkeiten und Irrtümer. Auf jeden Fall gestattet uns das Verfahren der Magnetostratigraphie, die mögliche Dauer ihres Aussterbens einzugrenzen. Wenn sämtliche Überreste spätkreidezeitlicher Dinosaurier in Sedimenten der Periode C-29-R vorkommen – und in keinen früheren oder späteren Sedimenten –, dann kann der Zeitraum ihres Aussterbens nicht mehr als eine halbe Million Jahre dieser Polaritätsepoche umfaßt haben.

Dieser vielversprechende Ansatz wurde leider 1979 durch eine Studie ins Wanken gebracht, die E. H. Lindsay und andere zu einer unvollständigen Sediment-Abfolge im San-Juan-Becken (Neu Mexiko) vornahmen. Diese Wissenschaftler behaupteten, noch in einer «normalen» Magnetfeld-Periode, wahrscheinlich *Chron-Cenozoic-29-normal*, die auf die Phase C-29-R folgte, habe es Dinosaurier gegeben. Nach Meinung anderer Forscher, die im selben Gebiet tätig waren, waren Lindsays letzte Saurier sogar nur die vorletzten. Sie waren überzeugt, die letzten Sedimente aus dem Mesozoikum im San-Juan-Gebiet seien durch Erosion abgetragen worden, und Lindsay sei auf frühere Fossilien gestoßen, die nicht aus der Endzeit der Saurier stammten. James Fassett vom Geologischen Forschungsamt der Vereinigten Staaten, der das östliche San-Juan-Becken erforschte, wo die Sedimentationsfolge während des Übergangs vom Mesozoikum zum Känozoikum nicht unterbrochen war, bereitete der Verwirrung ein Ende. Seine Resultate zeigten, daß in der Tat die Erosion Lindsay in die Irre geführt hatte. Seine letzten Dinosaurier lebten während der Periode C-32-N, etwas mehr als 5 Millionen Jahre vor dem Ende des Mesozoikums. Lindsays jüngste Resultate haben auch ihn selbst davon überzeugt, daß der Übergang von der Kreide zum Tertiär mit den ihn begleitenden Ereignissen im San-Juan-Becken in die Periode C-29-R fiel.

Während der paar letzten Jahre wurden in verschiedenen Teilen des westlichen Nordamerika zusätzliche magnetostratigraphische Studien durchgeführt. Die letzten Dinosaurier-Fragmente fand man dabei stets in umgekehrt magnetisierten Sedimenten. J. F. Lerbekmo aus Kanada identifi-

zierte diese Sedimente als C-29-R, indem er sich in einer Sedimenten-Abfolge in Alberta durch eine beträchtliche Passage des «Strichcodes» des remanenten Magnetismus hindurchlas. Die Wahrscheinlichkeit ist nun sehr groß, daß das Aussterben der Dinosaurier im Zeitraum von einer halben Million Jahre innerhalb dieser Epoche stattfand.

Starben sie so rasch aus wie die *Foraminiferen* von Gubbio? Die Funde von Dinosaurierknochen sind in keinem Fall reichlich genug, und die Technik ist nicht hinreichend perfektioniert, um den Schluß zuzulassen, daß die Dinosaurier innerhalb von Jahrtausenden, Jahrzehntausenden oder Jahrhunderttausenden ausstarben. Es bleibt aber die Tatsache, daß jede Zeitspanne, die weniger als eine Million Jahre beträgt, in der geologischen Terminologie als «kurz» und ihr Verlauf als «plötzlich» gilt. In solchen Begriffen ausgedrückt würde die Deutung, daß die Dinosaurier ihre «Herrschaft» an Land so abrupt – oder fast so abrupt – beendeten, wie das Plankton aus den Ozeanen verschwand, wenige Paläontologen zum Widerspruch herausfordern.

Die Frage bleibt, ob das große Sterben am Ende des Mesozoikums überall – sowohl auf dem Lande als auch im Meere – und nicht nur in Gubbio oder im amerikanischen Westen innerhalb der nur eine halbe Million Jahre umfassenden Epoche C-29-R stattfand.

Während der letzten Jahre durchgeführte magnetostratigraphische Untersuchungen gaben eine Bestätigung, was die Organismen im Meer angeht. Ich hatte die persönliche Genugtuung, auf meiner 1980 durchgeführten Bohr-Expedition im Südatlantik eine solche Bestätigung zu erhalten. Auch Sedimentproben von verschiedenen anderen Tiefsee-Bohrstellen im Atlantik und Pazifik deuteten samt und sonders darauf hin, daß die Grenze zwischen Kreide und Tertiär in der C-29-R-Epoche verlief. Eine Reihe von Studien über diese Grenze in urzeitlichen Tiefsee-Sequenzen, die in Spanien und Deutschland gehoben wurden und als anstehender Fels freiliegen, haben diese Folgerung bestätigt. Außerdem ordneten Paläobotaniker an Land die letzten Fossilienpollen einer Assemblage von Pflanzen, die gegen Ende der Kreidezeit ausstarben, gleichfalls der C-29-R-Epoche zu. Dadurch wurde unsere Gewißheit immer größer, daß zahlreiche Lebensformen – und zwar im Meer wie zu Lande, Pflanzen wie Tiere – während der Epoche *Chron-Cenozoic-29-reversed* (C-29-R) ausstarben.

Die während der letzten Jahre durchgeführten magnetostratigraphischen Untersuchungen haben zweifellos Lyells und Darwins Postulat einer großen Zeitlücke zwischen den letzten mesozoischen und den frühesten känozoischen Befunden den letzten Todesstoß versetzt. Die Zeit des Übergangs liegt als Streifen auf dem Meeresboden, zugleich aber auch als Sedimentschicht sowohl in ozeanischen als auch in kontinentalen Schichtenfolgen. Sie hat eine bestimmte Breite und eine bestimmte Tiefe. C-29-R ist eine Realität.

Deshalb müssen wir uns auf unsere Sinne verlassen. Wir müssen unseren Augen trauen. Wenn zahlreiche Lebensformen letztmals in C-29-R erscheinen, um dann niemals wieder aufzutreten, dann starben sie ganz plötzlich und gleichzeitig vor 65 Millionen Jahren auf der ganzen Welt aus.

Das Rätsel des Aussterbens

Das Aussterben ganzer Arten als Faktum für sich schien schon für viele Wissenschaftler schwerer akzeptabel als die Tatsache, daß es sich dabei um ein Massensterben handelte. Nach Linnaeus (Carl von Linné, 1707–1778) schuf Gott jeweils ein Paar – ein männliches und ein weibliches Individuum – von jeder getrenntgeschlechtlichen Art, jedoch nur ein einzelnes Individuum von jeder hermaphroditischen (doppeltgeschlechtlichen) Art.

«Es gibt so viele Arten», schrieb Linné in seiner 1751 erschienenen *Philosophia Botanica*, «wie das unendliche Wesen am Anfang verschiedene Formen erschaffen hat. Deshalb gibt es heute so viele Arten, wie am Anfang erschaffen wurden.»

In diesem Glauben war der große Schöpfer der wissenschaftlichen Nomenklatur der Lebewesen ganz Kind seiner Zeit, denn die meisten Gelehrten des achtzehnten Jahrhunderts gingen davon aus, die Arten seien die von Gott am Beginn aller Zeiten geschaffenen Grundeinheiten. Das Wesen der Linnéschen Unterteilung der Organismen in «Gattungen» war seine Überzeugung von der Unwandelbarkeit der Arten und deren feststehende Zahl.

Möglicherweise wurde Linnés Überzeugung doch durch die Tatsache erschüttert, daß durch Artenkreuzung vielleicht neue Arten entstehen könnten. Also baute er sich auf der Ebene der Gattungen, der nächsthöheren Stufe in seinem hierarchischen System der Nomenklatur, eine Verteidigungslinie auf. Die Gattungen mußten das Wesentliche sein, sie mußten jene «Strukturen» sein, die Gott im Anfang geschaffen hatte. Seine Anhänger jedoch schwankten nicht, was die Frage der Unveränderlichkeit und Wesenhaftigkeit der Arten anging.

Im Jahre 1753 kannte Linné etwa sechstausend Arten. Doch er dachte, die Gesamtzahl müsse sich auf etwa zehntausend belaufen. Die seit Linné beschriebenen Arten sind allerdings so zahlreich, daß wir das Zählen aufgegeben haben. Die jüngsten Schätzungen reichen von konservativen zwei Millionen bis zu dreißig Millionen als Obergrenze.

Die Zahl der Arten wäre auch für Linné kein Problem gewesen, selbst wenn er gewußt hätte, wie groß sie tatsächlich ist. Das Problem war, ob sich eine Art in eine andere verändern kann. Bei der Beschreibung fossiler Arten zeigte es sich, daß viele von den heute lebenden Arten völlig verschieden waren. Lamarck sah sich mit diesem Problem konfrontiert, nachdem er am Pariser Museum zum Professor für Insekten, Würmer und Mikroorganismen ernannt worden war. Er war ein zu guter Beobachter, um den Unterschied

zwischen fossilen und jetztzeitlichen Muscheln in der umfangreichen Molluskensammlung des Museums übersehen zu können, obwohl es auch Übereinstimmungen festzustellen gab. Um die Möglichkeit des Aussterbens ganzer Tierarten mit der Lehre der Bibel in Einklang zu bringen, erwogen seine Zeitgenossen, die ausgerotteten Lebewesen seien vielleicht böse Kreaturen gewesen oder hätten irgendwie die Arche Noahs verpaßt.

Ebenso doktrinär wie Lamarck in dem Glauben, daß sich die Welt seit ihren Anfängen nicht verändert habe, war der junge Lyell, der nur mit Schwierigkeiten akzeptieren konnte, daß eine frühere Welt von anderen Tier- und Pflanzenarten bewohnt gewesen sei. Cuviers Entdeckung der vier Tier-«Dynastien», deren Knochen in den Sedimenten des Pariser Beckens begraben lagen, kannte er. Doch zu Lyells Zeiten waren weite Gebiete noch unerforscht, und so war er sicher, daß er in weit entlegenen Gegenden schon die Abkömmlinge von anscheinend ausgestorbenen Tierarten finden werde. Selbst heute noch werden derartige Hoffnungen von Zeitungsberichten genährt, die beispielsweise von einem Quastenflosser (*Coelacanthus*) berichten, einem Fisch, der bisher nur als Fossil bekannt war und als seit 300 Millionen Jahren ausgestorben gilt, aber dann doch noch in den Gewässern vor Südwestafrika lebend gefunden wurde, oder von gewissen Ur-Sequoia-Gewächsen aus dem Miozän, die man in Urwäldern Südwestchinas entdeckte. Daß derartige Funde eine Zeitungsmeldung wert sind, unterstreicht nur, wie selten sie sind. Optimistische Abenteurer suchen noch immer nach den sprichwörtlichen Sauriern im Urwald am Kongo oder in den schottischen Seen, doch ihre Chance, eines der Tiere dort zu finden, ist außerordentlich gering. Stammt doch keines der etwas über fünftausend Saurierskelette, die der Wissenschaft bekannt sind, von einem Tier, das in Formationen verendete, die jünger sind als die Kreidezeit. Selbst wenn wir – wogegen alles spricht – je Nessie, das «Ungeheuer von Loch Ness» (und ihren Lebensgefährten) entdecken sollten, stehen wir noch immer vor dem Problem, das Aussterben aller anderen Saurier zu erklären.

Auch Lamarck, unbeugsamer Aktualist, der er war, konnte sich nicht mit den Forderungen seiner Zeitgenossen anfreunden, es müsse doch eine Art Sintflut oder eine andere Katastrophe gegeben haben, in der die Tiere der Urwelt umgekommen seien. Immerhin mußte er die Hoffnung aufgeben, daß geographische Unternehmungen vielleicht noch lebende Exemplare jener ausgestorbenen Arten antreffen könnten. Auch er war zunächst nicht frei von den geistigen Fesseln seiner Zeit (er klammerte sich an die Vorstellung, daß die Anzahl der Arten seit Anbeginn der Schöpfung feststünde), vollzog aber dann doch den revolutionären Schritt, die traditionelle Ansicht in Zweifel zu ziehen, daß sich die alten Arten nicht in neue verwandeln können. Besonders beeindruckt war er davon, daß manche fossilen Muscheln ein lebendes Gegenstück hatten, das mit ihnen nicht identisch war, aber dennoch Ähnlichkeiten mit einem zu Stein gewordenen Vorfahren aufwies. Also räumte er ein, daß die Arten vielleicht doch nicht statisch in ihrem Anfangszustand verharrten. Im Laufe von mehreren Generationen käme es zu Veränderun-

gen, die Schritt für Schritt zu geringfügigen Unterschieden zwischen Vorfahren und Nachkommen einer Art führten. Nicht alle Arten blieben so, was sie waren. Vielmehr haben sie sich nach ihrer Erschaffung verändert. Bei einigen Gruppen von Fossilien waren die evolutionären Veränderungen so augenfällig, daß Lamarck sie in eine chronologisch geordnete Reihe bringen konnte, die mit einer noch lebenden Art endete.

Derartige chronologische Reihen bezeichnet man heute als Abstammungslinien, und die Tatsache, daß heute so viele Abstammungslinien bekannt sind, ist eine Hauptstütze der modernen Evolutionstheorie. Indem er jedoch Abstammungslinien beschwor, umging Lamarck das Thema Aussterben. Das Aussterben gibt es nicht, behauptete er, nur ein «Pseudoaussterben». Keine ältere Art wäre jemals ausgestorben, sondern alle hätten sich durch schrittweise voranschreitende Evolution in der unermesslichen Zeit seit der Schöpfung in neue Arten verwandelt. Obwohl die Arten sich änderten, sei doch die Stammesgeschichte nicht durchbrochen worden, und wir hätten heute so viele Arten, wie Gott am Anfang schuf. Heutzutage kämpfen die Schöpfungsgläubigen gegen die Evolutionstheorie und den Aktualismus. Es nimmt sich wie Ironie aus, das eben diese Theorien ursprünglich von einem Schöpfungsgläubigen beschworen wurden, um eine theologische Lehre aufrechtzuerhalten. Eine Theorie einer schrittweise vor sich gehenden Evolution mußte postuliert werden, um die biblische Lehre von der festgesetzten Anzahl der Arten zu retten.

«Pseudoaussterben» ist ein nützlicher Gedanke. Ich erinnere mich an einen Oldtimer der Ölindustrie, der mir einst von der Entwicklung der berühmten «sieben Schwestern» erzählte. Sein Thema war, daß Ölgesellschaften nie pleite gingen. Sie entwickelten sich nur, änderten nur allmählich ihre Strukturen, ihre Namen dafür um so plötzlicher. In den Notierungen der Börse finden sich Standard Oil aus New Jersey, Secony Vacuum, Roxana oder Amerada nicht mehr. Dafür gibt es nunmehr Exxon, Mobil, Shell und AMOCO. Natürlich starben auch hier die alten Firmen nicht wirklich aus. Allerdings gab es auch ein echtes Firmensterben, als beispielsweise in den ersten Jahren dieses Jahrhunderts John Rockefeller seine Konkurrenz überumpelte. Neue «Arten», so fuhr besagter Oldtimer fort, entstanden auch, als durch die Antitrust-Gesetzgebung die alte Standard Oil in regionale Firmen mit Sitz in New Jersey, Kalifornien, Ohio, Indiana und Texas aufgeteilt wurde.

Entsprechend ist auch der paläontologische Befund voller Beispiele von Abstammungslinien, innerhalb derer man von «Pseudoaussterben» sprechen kann. Man denke nur an die wilden Vorformen unserer Haustiere. Und doch sind die Archive noch eindrucksvoller mit Zeugnissen echten Aussterbens ausgestattet, wie die Beispiele der Dinosaurier und anderer Riesenechsen belegen. Aus dem *Hadrosaurus* wurde ebensowenig ein Känguruh wie aus dem *Ichthyosaurus* ein Wal oder aus dem *Pterosaurus* eine Fledermaus. Die durch das Tiersterben leerstehenden ökologischen Nischen wurden in der Folge von neuen Säugetierarten eingenommen, die sich entlang ähnlicher Entwicklungslinien entwickelten, um an ähnlichen «Ar-

beitsplätzen» ähnliche Aufgaben zu erfüllen, doch auf gar keinen Fall vom selben Stamm waren.

Abgesehen von all ihren verfehlten Versuchen, durch Begriffe wie «Pseudoaussterben» die Lehre von der festgesetzten Anzahl der Arten zu retten, hatten die Aktualisten doch auf eine Art recht. Seit etwa 600 Millionen Jahren nämlich, und erst seit diesem Zeitpunkt ist der Fossilien-Befund klar genug, um die Arten zu zählen, hat die Anzahl der Arten bis zur Gegenwart tatsächlich überraschend wenig zugenommen. Der Zahl der jeweils zu einem bestimmten Zeitpunkt existierenden Arten entspricht, was die Paläontologen als Diversität bezeichnen. Der Vergleich der Diversität in der einen mit der Diversität in der anderen Periode ist für die Paläontologen ein quantitatives und qualitatives Maß der im Laufe der Erdzeitalter vor sich gegangenen Veränderungen.

Doch die Diversität zu messen, ist nicht so einfach, denn es geht nicht nur darum, alle Arten von Lebewesen zu zählen, die es in einer bestimmten geologischen Periode gab. Erdzeitalter sind keineswegs gleich lang. Beispielsweise dauerte das Ordovizium doppelt so lange wie das Silur, und deshalb werden aus dem Ordovizium auch zweimal so viele Arten beschrieben. Das Problem ist etwa das gleiche, als ob man die Anzahl der Gräber, auf die es ein bestimmter Dorfkirchhof in einem Jahrhundert bringt, mit der Anzahl der Gräber vergleicht, die in fünfzig Jahren zusammenkommen. Der länger benutzte Friedhof hat vielleicht zweimal so viele Gräber wie der andere. Doch läßt der Vergleich nicht die Schlußfolgerung zu, daß das Dorf während der längeren Zeitspanne doppelt so viele Einwohner hatte. Um mit diesem Problem der unterschiedlichen Dauer geologischer Epochen fertig zu werden, schlug David Raup von der Universität Chicago vor, die Anzahl der Arten für jeweils eine Jahrmillion einer Epoche zum Maßstab der Vielgestaltigkeit zu nehmen. Nach diesem Maßstab haben die Faunen des Ordovizium und des Silur die gleiche Diversität aufzuweisen.

Ein weiteres Problem ist das Volumen des Felsgesteins, das die Hinterlassenschaft der Tier- und Pflanzenwelt einer Epoche birgt. Je älter Sedimente sind, desto mehr sind sie durch Erosion abgetragen oder wurden samt ihren Fossilien bei gebirgsbildenden Prozessen in Kristallingestein umgewandelt. Das Känozoikum, in dem wir leben, dauert etwa genauso lange wie die Kreidezeit. In Zahlen ausgedrückt: 65 Millionen Jahre der bisherigen Dauer des Känozoikums stehen 70 Millionen Jahre Kreidezeit gegenüber. Doch die Masse der känozoischen Sedimente ist etwa doppelt so groß wie die der Kreidezeit. Man darf wohl davon ausgehen, daß auch die Anzahl der Fossilien in ihnen doppelt so groß ist. Und tatsächlich wurden bisher auch zweimal so viele Fossilien känozoischen Ursprungs gefunden und beschrieben. Abermals eignen sich Friedhöfe für einen Vergleich. Je weniger Friedhöfe aus einer bestimmten Periode der Vergangenheit noch existieren, desto weniger Gräber lassen sich nachweisen, unabhängig von der einstigen Bevölkerungsziffer. Um zu einer möglichst zutref-

fenden Schätzung der Arten-Vielgestaltigkeit zu gelangen, mußte Raup also nicht nur die Anzahl der Arten pro Jahrmillion zählen, sondern berücksichtigen, was jeweils von Sedimenten verschiedenen Alters an Proben zu erwarten ist. Trotz dieser erschwerenden Umstände gelangte Raup 1976 zu der überraschenden Folgerung, daß die Artenvielfalt bei wirbellosen Meerestieren, den am besten erhaltenen Fossilien, über 600 Millionen Jahre bemerkenswert konstant geblieben ist. Nicht alle Kollegen nahmen Raups Schlußfolgerung an. Vielmehr gab es zahlreiche Diskussionen um private Auseinandersetzungen. Doch schließlich kamen vier führende Vertreter seiner Gegner zu einem Kompromiß und veröffentlichten 1981 ein gemeinsames Papier, in dem sie erklärten, daß die Zunahme der Artenvielfalt, wenn von einer solchen überhaupt die Rede sein kann, im Verlauf der letzten 600 Millionen Jahre sehr bescheiden war.

Eine detaillierte Analyse zeigt, daß die scheinbar feststehende Anzahl der Arten in hohem Maße darauf zurückzuführen ist, daß jedem Massensterben immer wieder eine Phase rascher Erholung folgte. Ursprünglich verfiel man in die Aufgliederung der geologischen Zeit in Erdzeitalter wie Paläozoikum, Mesozoikum und Känozoikum, weil den Gelehrten die drastischen Veränderungen aufgefallen waren, welche jeweils den Übergang zwischen zwei dieser Epochen markierten. Am Ende jeder geologischen Ära gab es einen drastischen Rückgang der Vielfalt, und zwar keineswegs nur der Artenvielfalt, sondern auch im Bereich der biologischen Gattungen und Familien. Beispielsweise zählte Dale Russell die Anzahl der Gattungen vor und nach dem Ende der Kreidezeit. Sein Ergebnis: Die Organismen zu Land und im Süßwasserbereich – also an und in Flüssen und Seen – verzeichneten insgesamt nur einen relativ geringfügigen Artenrückgang. Die Reptilien dagegen (einschließlich der Dinosaurier) wurden um mehr als die Hälfte von 54 auf 23 Gattungen reduziert. Auch die Diversität mehrerer Gruppen von Meeresorganismen wurde ebenso drastisch beschnitten. Planktonische Mikroorganismen beispielsweise erlitten eine durchschnittliche Diversitätseinbuße von etwa vierzig Prozent, von 298 auf 173 Gattungen. Besonders einschneidende Verluste erlitten die planktonischen *Foraminiferen* und das Nanoplankton, dessen Skelette aus Kalk bestehen. Sie wurden allerdings teilweise dadurch aufgewogen, daß andere planktonische Organismen, deren Skelette aus Silizium, dem Hauptmineral des Sandes bestehen, weniger Schaden davontrugen. Bei Meeresbodenbewohnern ging die Vielfalt von 1976 auf 1012 Arten – also etwa um die Hälfte – zurück. Die größten Einbußen erfuhr die schwimmenden Meeresorganismen. Die Vielfalt ihrer Gattungen ging von 332 auf 99 zurück. Das ist ein Rückgang von nicht weniger als 70 Prozent.

Russell kam beim Zählen auf 2862 Gattungen aus der späten Kreide und 1502 Gattungen aus dem frühesten Tertiär. Zumindest die Hälfte aller Gattungen ging während der letzten Phase der Kreidezeit zugrunde. In Wirklichkeit ist die Zahl wohl sogar noch höher. Denn Russell zählte zu den tertiären Gattungen nicht nur solche, die es vor dem großen Sterben gegeben hatte,

sondern auch neue, die erst danach aufkamen. Die tatsächliche Verhältniszahl der ausgestorbenen Arten muß mithin größer als 50 Prozent gewesen sein.

Paläontologen, die sich mit Problemen biologischer Statistiken weniger gut auskennen, können leicht durch unbedarftes «Leichenzählen» in die Irre geführt werden, denn das Bild der Vielfalt einer fossilen Assemblage wird durch sehr viele Faktoren beeinflusst.

Beispielsweise entging Tove Birkelund, einer sonst ausgezeichneten Paläontologin, die den Lehrstuhl für Geologie der Universität Kopenhagen innehat, ganz und gar das Ende einer Gemeinschaft von Meerestieren, die sie in Dänemark untersucht hatte. Auf der Basis der Artenvielfalt der Tierpopulationen, die am Ende der Kreidezeit auf dem Meeresgrund lebten, behauptete sie, am Ende der Kreidezeit habe sich nichts Ungewöhnliches ereignet. Dies erstaunte ihre Hörer und Leser, denn sie verkündete dies 1981 ausgerechnet in einer Denkschrift, die einer wissenschaftlichen Konferenz in Snowbird, Utah, vorgelegt wurde, auf der Geologen zusammengekommen waren, um das möglicherweise katastrophale Ende der Kreidezeit zu diskutieren. Warum sollten die wirbellosen Bewohner des Meeresgrundes ungeschoren davongekommen sein, während die umhertreibenden Planktontierchen in demselben flachen Meer fast vollständig ausgerottet worden waren?

Frau Birkelund befaßte sich ganz besonders mit der Artenvielfalt in einer Gruppe von Tieren, die man als *Cheilostoma Bryozoa* bezeichnet. Die *Bryozoen*, auch «Moostierchen» genannt, sind winzige Wasserbewohner, die in Kolonien leben. Die Gruppe, die Frau Birkelund untersucht hatte, produziert aus Kalk bestehende Skelette, die ein komplexes Muster aufweisen. Jede Art hat ihr eigenes Muster, so daß die Unterscheidung zwischen ihnen nicht schwer fällt. Frau Birkelund zufolge gab es in der letzten Phase der Kreidezeit ebenso wie im frühesten Tertiär eine «immense Vielfalt» dieser *Bryozoen*. In der Maastricht- und Daniumphase lebten allein in Dänemark über fünfhundert Arten. Außerdem vermerkte sie, die Vielfalt «während des Daniums» sei «von derselben Größenordnung wie während der Maastrichtphase». Ja – sie charakterisierte diese Gleichheit über die berühmte Grenze hinweg als «evolutionären Stillstand».

Doch Frau Birkelunds Statistiken, die sie 1981 in einem Artikel für die Geologische Gesellschaft Amerikas veröffentlichte, sprachen eine andere Sprache:

Eine besonders detaillierte Untersuchung der Cheilostoma-Bryozoen in der Grenzsequenz Nye Klov in Nordwest-Jylland (1979 durch Hakansson und Thomsen) ergab eine Gesamtpopulation von 115 Arten (...): 60 Arten haben eine eingeschränkte Verteilung im Maastrichtien (...); 11 Arten kommen sowohl im Maastrichtien wie im Danium vor, während 44 Arten auf das Danium beschränkt sind (...) Sämtliche Kreide-Populationen des Maastrichtien sind hochgradig verschieden (...) In deutlichem Gegensatz hierzu enthält der basale Kreidemergel des Daniums eine extrem kärgliche Fauna, die unmittelbar an der Basis mit einer einzigen Art beginnt und es innerhalb des

ersten Meters (der Sedimente) auf nicht mehr als vier Arten bringt. Hervorgehoben sei, daß keine der Arten, die die Grenze zwischen dem Maastrichtien und dem Danium überlebt hat, in dieser Pionier-Gemeinschaft vertreten ist. Nach diesem extremen Rückzug steigen in etwa sechs Metern Höhe über der Grenzlinie im Bryozoen-Kalkstein sowohl die Vielfalt als auch die Populationsdichte rasch auf ein Maximum von mehr als vierzig Arten.

In die Alltagssprache übersetzt, sagt uns die wackere Professorin, daß plötzlich sämtliche *Cheilostoma-Bryozoa* aus Nye Klov verschwanden, um durch eine vereinzelte Gruppe zugewanderter Organismen ersetzt zu werden. Mehr als achtzig Prozent der kreidezeitlichen Organismengemeinschaft kehrten nie wieder zurück. Während der ersten Jahrmillionen nach dem Massensterben schlossen sich der ersten Pionierart in der dänischen Kreide ein paar neue Zuwanderer an, von denen einige irgendwo Zuflucht gefunden und so die Wende zwischen den Erdzeitaltern überlebt hatten. Doch die neuentstandenen Gruppen beherrschten das Bild. Neuentwickelte Arten machten mehr als achtzig Prozent der *Bryozoen*-Population des Daniums aus. Die vorübergehend verlorene Diversität war wiederhergestellt.

Frau Birkelunds Fehler, den auch andere machten, bestand darin, daß sie das «Vorher» und das «Nachher» miteinander verglich, aber die kritische Zeit des Wechsels selbst außer acht ließ. Wenn wir Deutschlands Wirtschaft ein Jahrzehnt vor und ein Jahrzehnt nach dem Zweiten Weltkrieg miteinander vergleichen, könnte man den Eindruck gewinnen, es habe für sie einen entwicklungsmäßigen «Stillstand» gegeben. In Wahrheit lag ihre totale Zerschlagung im Jahre 1945 dazwischen, der allerdings ein Wirtschaftswunder in den Nachkriegsjahren folgte.

Abruptes Massensterben erschien vielen Gelehrten noch weniger akzeptabel als die bloße Tatsache des Aussterbens an sich und wurde von oberflächlichen Analysen immer wieder vertuscht. Beispielsweise erweckten manche Paläontologen durch unsachgemäßen Umgang mit ihrem statistischen Material den Eindruck, daß *Ammoniten*, diese schwimmenden Weichtiere mit ihren spiralförmigen Gehäusen, die an Widderhörner erinnern, im Laufe von Jahrmillionen ganz allmählich ausstarben und daß das, was sich am Ende der Kreidezeit ereignete, nur der letzte Tropfen war, der das Faß zum Überlaufen brachte. Ein Paläontologe in Spanien zählte 1969 in einer als Albien bezeichneten Stufe der Mittleren Kreide mehr als 150 Gattungen dieser *Ammoniten*, fand jedoch nur drei in den obersten Maastricht-Sedimenten, die unmittelbar vor dem Ende des Mesozoikums abgelagert worden waren. Seiner Ansicht nach bedeutete dies, daß die *Ammoniten* ganz allmählich zugrunde gegangen sein müssen, bevor es auch die letzten Überreste dieser einst so bedeutenden Gruppe traf. Leider hatte sich der spanische Paläontologe zwar auf Taxonomie spezialisiert, war aber kein gründlicher Biostatistiker. Er ließ die Tatsache unberücksichtigt, daß das Albium sehr viel länger dauerte als die Zeitspanne, in der die letzten Maastricht-*Ammoniten* lebten.

Frau Tove Birkelund untersuchte die letzten *Ammoniten* in Dänemark.

Zusätzlich zu den in Spanien nachgewiesenen drei Gattungen gelang es ihr, sieben weitere *Ammoniten*-Gattungen nachzuweisen. Sie finden sich unmittelbar unter dem Fischton im jüngsten maastrichtzeitlichen Felsgestein bei Stevns' Klint. Doch Frau Birkelund betonte, jede maastrichtzeitliche Gattung von *Ammoniten* bestünde aus nur wenigen Arten. Dieser Mangel an Vielfalt signalisierte ihr, die *Ammoniten* hätten sich schon ein gutes Stück vor dem Ende der Kreidezeit auf dem absteigenden Ast befunden. Doch vergaß sie die Tatsache, daß sich an Land nicht viel Gestein maastrichtzeitlichen Ursprungs findet. Vielleicht wären viel mehr maastrichtzeitliche *Ammoniten* aufgetaucht, wenn die marinen Sedimente der Maastrichtphase, die sie untersuchte, so verbreitet gewesen wären wie die des Albiums.

Neues Belegmaterial aus einer neu erschlossenen Bezugsquelle deutet darauf hin, wie vorsichtig man sein muß, was das Potential an erfolgreichen Proben angeht. Gegen Ende des Mesozoikums befanden sich Europa und Nordamerika in einem Zustand der Regression. Flache Meere zogen sich von zuvor überschwemmten kontinentalen Küsten zurück. In der nördlichen Hemisphäre stehen daher wenig Meeressedimente als Felsgestein an, und man findet auch nur wenig maastrichtzeitliche *Ammoniten*. Doch in der Antarktis verhielt es sich genau umgekehrt. Hier griff immer mehr der Ozean auf das Land über, und die ozeanischen Ablagerungen der Maastrichtphase in diesem entlegenen Gebiet sind weiter verbreitet als die aus der älteren Kreidezeit. Daher überraschte es nicht, als ein junger argentinischer Wissenschaftler kürzlich erklärte, die Vielfalt der *Ammoniten* im dortigen Gebiet habe zu-, nicht abgenommen, als ganz plötzlich über das Mesozoikum das Ende hereinbrach.

Der allmähliche Niedergang – im Gegensatz zum plötzlichen Aussterben – ist ein Vorurteil der Aktualisten, ein Vorurteil, das Paläontologen allerdings oft verlockend erschien. Wie Frau Birkelund sind sie allgemein von der altehrwürdigen Vergreisungstheorie überzeugt, die auf der Annahme beruht, daß urzeitliche Tierfamilien, Gattungen oder Arten von Organismen ihren «evolutionären Schwung» verlieren. Nach dieser Theorie waren die alt gewordenen *Ammoniten* so unausweichlich ihrem Aussterben als Art geweiht, wie alte Menschen auf ihren individuellen Tod warten.

Doch die Analogie stimmt nicht genau. Individuen haben eine durchschnittliche Lebenserwartung; Arten, Gattungen und Familien von Lebewesen dagegen nicht. Kaum jemand würde behaupten, daß Küchenschaben ihren «Schwung» verloren haben, obwohl sie von einer der ältesten Familien fossiler Insekten abstammen und nach wie vor zu den primitivsten geflügelten Insekten gehören. Die unmittelbaren Vorfahren des amerikanischen Opossums lebten zur gleichen Zeit wie die letzten Dinosaurier. Die riesenhaften Mammutbäume kommen von einem sehr alten Stamm, der 200 Millionen Jahre alt ist. Ginkgobäume übertreffen ihr Alter noch um 50 Millionen Jahre. Am eindrucksvollsten dem Alter nach ist die kleine Armfüßergattung *Lingula*, die sich schon unter den ältesten Fossilien des Kambriums findet, das mehr als eine halbe Milliarde Jahre zurückliegt. Der Langlebigkeit einer Gattung scheinen mithin keine Grenzen gesetzt.

Was speziell die *Ammoniten*-Gattungen angeht, die Frau Birkelund untersucht hatte, so gehörten sie tatsächlich zu den ältesten Formen der *Ammoniten*, die ohne wesentliche evolutionäre Veränderungen schon seit Millionen Jahren lebten. Die Frage, die auf der Hand liegt, lautet also nicht: Besaßen sie noch «Schwung»? , sondern: Warum fanden sie ein so abruptes Ende, nachdem sie so lange gelebt hatten? Ein plötzlicher Tod ist ein plötzlicher Tod, ganz gleich, ob das Opfer jung oder alt ist.

Detaillierte Sedimentstudien in Dänemark deuten auf das gleiche Muster eines plötzlichen Aussterbens nicht nur bei *Foraminiferen* und *Bryozoen* hin. Finn Surlyk und Marianne Johansen untersuchten die dänischen *Brachiopoden* (Armfüßer), an Tentakeln festsitzende, Muscheln ähnelnde Tiere, die sich auf flachen Meeresböden ernähren. Die obere maastrichtzeitliche Kreide bei Nye Klov enthält 27 Arten, die Kreide des Daniums 35. Von den 27 Arten des Maastrichtiens fanden sich fünf im «Fischton», der die Grenze zwischen Mesozoikum und Tertiär bildet und das früheste Sediment des Daniums ist. Nur sechs andere Arten überlebten die Krise bis weit hinein ins Danium. Mittlerweile tauchten im Danium zum ersten Male 24 neue Arten auf. Mit anderen Worten: Nur sechs von 27 Arten überlebten den Beginn des Daniums. Dies ist eine Todesrate von etwa achtzig Prozent. Doch die fast ebenso rasche Erholung führte schließlich zu einem Vielfältigkeitsgewinn von dreißig Prozent auf der anderen Seite der Grenze.

Surlyk war ein Kollege von Frau Birkelund in Kopenhagen und ebenso wie sie in der besten klassischen Tradition ausgebildet. Einige Zeit, bevor er seine Untersuchungen der Armfüßer-Muscheln beendet hatte, wurde er von den Herausgebern der Zeitschrift *Nature* aufgefordert, einen von mir verfaßten Artikel über das plötzliche Tiersterben am Ende der Kreidezeit zu besprechen. Er war skeptisch und predigte Vorsicht. Doch nachdem er seine Arbeiten in Nye Klov beendet hatte, zögerte er nicht mehr. Der Wechsel der Armfüßer-Fauna bei Nye Klov hatte nichts mit Pseudoaussterben zu tun. Vielmehr hoben Surlyk und Johansen bedeutende Unterschiede zwischen den Gattungen der Maastrichtzeit und des Daniums hervor. Die maastrichtzeitlichen *Brachiopoden* (Armfüßer) wurden einfach getötet. Neue Arten entwickelten sich dann später aus einer Handvoll überlebender Tiere. Das Muster des Sterbens war genau dasselbe wie bei den *Foraminiferen* von Gubbio.

Und das Ende kam auch nicht allmählich. Die Armfüßer waren nicht zurückgegangen oder «kraftlos» geworden. Wie Surlyk und Johansen in einem Artikel für das Wissenschaftsmagazin *Science* schrieben: «Es gab keine Warnung in Form einer Abnahme der Populationsdichte, Populationsvielfalt oder der frühen Ausrottung besonders spezialisierter Gruppen.» Ganz plötzlich, im Verlauf nur einer halben Million Jahre, wie in einer Falle gefangen in jener bewußten Tonschicht, starben mehr als drei Viertel der Armfüßer aus. Wie die *Bryozoen* des Daniums von Nye Klov oder die *Globigerina eugubina* aus dem Danium der Schichten bei Gubbio begannen aber dann auch die

daniumszeitlichen Armfüßer eine abrupte Neuentwicklung, sobald die Fauna der Maastrichtphase verschwunden war. Ihre rapide Entwicklung einer neuen Artenvielfalt war mehr als nur der Ausgleich des erlittenen Verlustes.

Das «Leichenzählen» allein belegt die ernsten Folgen der Katastrophe des Aussterbens, doch es sagt nichts über die Schwere, die Heftigkeit und das Ausmaß dieser Katastrophe selbst aus. Um einen Begriff davon zu bekommen, wie rasch das Sterben vor sich ging, müssen wir den Prozentsatz der Arten unter die Lupe nehmen, die während einer bestimmten Zeitdauer ausgestorben sind. Laufend sterben Arten aus. Aus sorgfältigen Untersuchungen der Aussterberate känozoischer Molluskenarten im Pazifik ergab sich, daß alle sieben Millionen Jahre etwa die Hälfte aller Molluskenarten ausstirbt. Diese normale Aussterberate bezeichnet man als «Hintergrundausterben». Sie bleibt im Laufe der Jahrtausende konstant. Wenn dieses «Hintergrundsterben» bei Mollusken alle 7 Millionen Jahre die Hälfte der Anzahl aller Arten ausmacht, dann bedeutet eine Reduktion um die Hälfte in nur 3,5 Millionen Jahren oder um drei Viertel in 7 Millionen Jahren eine Verdoppelung der Aussterberate. Die von Surlyk und Johansen über dänische Armfüßer erhobenen Daten deuten aber auf einen Rückgang von etwa drei Vierteln in nur einer halben Million Jahren hin. Diese Quote ist mindestens zwanzigmal größer als normal. Je kürzer die Zeitspanne, desto größer nimmt sich die Katastrophe aus. Sollte der Zeitraum, den der Fischton repräsentiert, nicht mehr als fünfzigtausend Jahre betragen, lag die Aussterberate um den Faktor zweihundert höher als normal.

Trotz so eindrucksvoller Beweise sowohl für die Schwere der Katastrophe als auch für die Höhe der Aussterberate am Ende des Mesozoikums lassen sich doch die Aktualisten ihre Hoffnungen nicht so leicht rauben. So wie einst Linné gehofft hatte, seine Vorstellungen von der Immutabilität der Arten retten zu können, indem er sie von der Ebene der Arten auf die der Gattungen verlagerte, so versuchen Paläontologen heute das Faktum des Massenaussterbens als nicht gravierend hinzustellen, indem sie beim Zusammenstellen der Todeslisten höheren Größenordnungen in der taxonomischen Hierarchie den Vorzug geben. Wenn ein Heerführer nach einer massiven Niederlage seinem Vorgesetzten meldet, daß es von jedem Regiment, das unter seinem Kommando stand, Überlebende gibt, so besagt das nicht viel. Denn vielleicht sind manche seiner Regimenter nahezu vom Erdboden verschwunden, und von anderen gibt es nur noch ein paar Versprengte. Eine noch größere Katastrophe kann er eventuell vertuschen, indem er sagt, es gäbe noch Überlebende von jeder Division, wenn schon die Mehrzahl seiner Regimenter nicht mehr existiert. Manche Paläontologen gehen ganz ähnlich vor, um zu demonstrieren, daß das Mesozoikum nicht mit einem Massensterben endete. Ich habe Berichte über dieses Massensterben gesehen, die nicht von Arten oder Gattungen, sondern von Familien oder Ordnungen (im Sinne der biologischen Systematik) ausgehen. Doch je höher man in der Rangordnung der Klassifikation geht, desto mehr führen die Resultate in die Irre. Wenn wir

beispielsweise Klassen als Bezugseinheit für das Aussterben nehmen, schlägt nicht einmal das Ende der Dinosaurier zu Buche, denn die Klasse der Reptilien lebte ja weiter. Mit Tabellen, die auf solchen Daten fußen, ließe sich «beweisen», daß am Ende der Kreidezeit überhaupt nichts geschah.

Doch schon auf der Ebene der «Familien» wird deutlich, daß im Laufe kurzer Zeit gegen Ende der Kreidezeit die Zahlen rapide und drastisch zurückgingen. Dave Raup und seine Mitarbeiter erstellten kürzlich eine statistische Analyse des Überlebensmusters für Familien fossiler Meeresorganismen. Nach ihren Zählungen gab es am Beginn der Kreidezeit vor 135 Millionen Jahren 289 Familien von Wesen, die im Meer lebten. Die Wissenschaftler berechneten die Rate, mit der damals die Tierwelt zwischen dem angegebenen Zeitpunkt und dem Ende der Periode vor 40 Millionen Jahren ausstarb. Nach etwa 28 Millionen Jahren waren 29 Familien von der Bildfläche verschwunden, nach 64 Millionen Jahren schon fünfundsechzig. Das ergibt für die damalige Zeit eine Hintergrundrate von einer Familie pro Jahrmillion. Dann aber gingen in den letzten fünf Millionen Jahren der Kreidezeit 10 % der ursprünglichen Familienanzahl (dies sind beinahe 30) zugrunde. Nach dem Beginn des Känozoikums fiel die Aussterberate auf ihren Normalwert zurück.

Raup unterließ es, detaillierte Angaben über die Dauer des beschleunigten Artensterbens am Ende der Kreidezeit zu machen. Wenn die Tierfamilien während der fünf Millionen Jahre der Maastrichtzeit ausstarben, so bedeutet dies eine Steigerung der Aussterberate auf das Sechsfache des Normalen. Verschwanden sie während der eine halbe Million Jahre dauernden Epoche C-29-R, so heißt dies, daß die Rate bereits auf das Sechzigfache angestiegen war. Sind aber all diese Familien in der kurzen Zeit ausgestorben, in der der «Grenztön» abgelagert wurde, dann muß die Todesrate geradezu katastrophal gewesen sein: Sie müßte das Fünfhundertfache der für die Meeresfauna normalen Hintergrundrate betragen haben.

Wenn man richtig mit ihnen umgehen kann und sie richtig liest, besagen die Statistiken, daß die Anzahl der Arten keineswegs unveränderlich und die Rate ihres Aussterbens und ihrer Verdrängung durch neue Arten keineswegs beständig ist. Berechnungen der Artendiversität zeigen darüber hinaus, daß das Massensterben ganz plötzlich und ohne Vorwarnung eintreten kann, denn nichts an den gesunden und von Lebenskraft erfüllten, vielfältigen *Foraminiferen* (Kammerlingen), *Bryozoen* (Moostierchen) und *Brachiopoden* (Armfüßern) deutete darauf hin, daß ihr Ende nahe war.

Die «Leichenzählerei» allein kann aber keine Auskunft darüber geben, wie diese blühenden, gedeihenden Meerestiergemeinschaften untergingen. Noch rätselhafter ist das enorme Ausmaß der Katastrophe: Was immer das Plankton und die Armfüßer im Meer umbrachte, bereitete wahrscheinlich auch den Dinosauriern zu Lande das Ende – ebenso wie den Myriaden anderer Organismen, denen es nicht gelang zu überleben und sich in die nächste Ära der Menschheitsgeschichte hinüberzuretten.

Man kann nicht anders als die Schlußfolgerung ziehen, daß es eine

Katastrophe weltweiten Ausmaßes war, die gleichzeitig über zahlreiche verschiedene Gruppen von Organismen an Land und im Ozean hereinbrach und dem Mesozoikum ein plötzliches Ende bereitete.

Vor einer ganzen Reihe von Jahren, als ich noch ein junger Mann war und für die Shell-Forschung arbeitete, rückte ich gewöhnlich mittags meinem Freund Alfred Traverse in dessen Büro «auf die Bude», um zusammen mit ihm mein Mittagsbrot zu verzehren. Eines Mittags fand ich ihn an seinem Schreibtisch in die neueste Ausgabe eines Handelsjournals vertieft. Ich setzte mich hin, begann mein Brot zu verzehren, doch er reichte mir das Blatt herüber und sagte: «Wirf' doch mal einen Blick auf diesen Artikel über die Dinosaurier. Meinst Du, der Bursche ist seriös? Oder ist «de Laubenfels» nur ein Pseudonym für jemanden, der uns ans Bein pinkeln will?»

Ich überflog die Seiten beim Kauen. Es war recht anregend. De Laubenfels behauptete, die letzten Dinosaurier seien nach dem Fall eines Riesenmeteoriten durch «heiße Luft» getötet worden. «Heiße Luft» aber ist im Amerikanischen ein umgangssprachlicher Ausdruck für leeres Gerede. Traverse hielt den Artikel daher für eine Satire. Der Autor, so glaubte er, habe uns zu verstehen geben wollen, daß wir die Dinosaurier zu Tode geredet hätten.

Aber welche Arten von leerem Gerede gab es denn, um ihr Massensterben zu erklären?

Am meisten gefiel mir eine Erklärung, auf die Tony Swain, ein Spezialist für chemische Taxonomie in Kew Gardens, London, verfallen war. Swain veröffentlichte sein Elaborat 1974 unter dem reißerischen Titel: *Kaltblütiger Mord in der Kreidezeit*. Es ging darin um Chemikalien, die von Pflanzen synthetisch erzeugt werden, um pflanzenfressende Tiere abzuschrecken. Farne und Nadelhölzer bedienen sich zu diesem Zweck kondensierter Tannine, die aber offensichtlich den Dinosauriern kaum Schaden zufügten, denn gerade diese Pflanzen waren die Grundnahrung vieler pflanzenfressender Saurierarten. Gegen die Mitte der Kreidezeit aber hätten blütentragende Pflanzen einen explosiven Entwicklungssprung getan, durch den sie überall zu den dominierenden Pflanzenarten und damit auch zum Hauptfutter «vegetarisch» lebender Dinosaurier geworden seien. Ihre Abschreckungs-Chemikalien seien Alkaloide. Diese seien unangenehm bitter und verursachten schon in kleinen Mengen Krankheiten. In größeren Mengen genossen, seien sie sogar tödlich. Säugetiere jedenfalls mögen diese Alkaloide nicht und drosseln ihren «Genuß» auf ein Niveau, auf dem sie unschädlich sind. Reptilien dagegen, beispielsweise die Schildkröten, mit denen Swain experimentierte, finden solche Pflanzen schmackhafter und überfressen sich. Die Folge sind «schwere körperliche Störungen, ja sogar der Tod».

Von diesem «Geschmacksunterschied» ausgehend, den er zwischen Säugetieren und Reptilien entdeckt hatte, machte Swain einen tollkühnen Gedankensprung. Er setzte einfach Dinosaurier mit Schildkröten gleich, und weil ihn der unstillbare Appetit dieser Tiere beeindruckt hatte, unterstellte

er, die Dinosaurier hätten sich – bis hin zur völligen Ausrottung – an den giftigen Pflanzen zu Tode gefressen.

Es war eine gute Geschichte, doch kein Geologe nahm sie ernst. Und selbst wenn alle Mutmaßungen Swains zuträfen – sie erklärten doch nur den Tod der pflanzenfressenden Dinosaurier. Wer aber «ermordete» die fleischfressenden Tyrannosaurier? Und wie erklärt sich, daß die von Swain angenommene Wirkung erst so spät eintrat, denn die Dinosaurier starben erst viele Millionen Jahre nach dem ersten Auftauchen von Blütenpflanzen aus? Swain hatte die Vielfalt der Reptilien, der wirbellosen Meerestiere, der Säugetiere, Vögel, ja sogar einiger Blütenpflanzen ignoriert, die damals alle zur gleichen Zeit untergingen. Seine Idee wäre schon längst vergessen, wenn sie nicht so amüsant wäre.

Einem anderen Szenario zufolge, das ebensowenig überzeugt, wurden die Dinosaurier nicht durch Gift umgebracht, sondern sie verhungerten. Nach dieser Version brach die Nahrungskette zusammen, als das Phytoplankton – einzellige Pflanzen mit Photosynthese, welche die Hauptmasse der an der Meeresoberfläche treibenden Lebewesen bilden – am Ende der Kreidezeit in großem Umfange abstarb. Die Dinosaurier waren schließlich die letzten Opfer in dieser Kette.

Die Einzeller, aus denen das Phytoplankton besteht, haben in der Regel einen Durchmesser von weniger als 0,01 Millimeter. Sie leben davon, daß sie mittels Photosynthese Phosphor und Stickstoff aufnehmen, und gedeihen ganz besonders in Küstengewässern, wo reichhaltige Nahrung für sie vorhanden ist. So klein sie sind – wenn sie sich fortpflanzen, finden sich in jedem Liter Meerwasser Millionen und Milliarden dieser Lebewesen. Man spricht dann von ihrer «Blüte». Phytoplankton mit weichen Körpern hinterläßt nach seinem Absterben kaum Spuren. Doch die Arten, deren Körper eine harte Schale besitzt, das kalkhaltige Nannoplankton, gehören zu den Lebewesen, die Skelette von einzigartiger Form aufbauen, welche für jede Art verschieden sind. Diese Skelette überleben den Tod ihrer weichkörperigen «Bewohner» und sinken auf den Meeresboden. Die aus ihnen entstandenen Kreidesedimente und Kalkgesteine sind also auf ihre Weise Zeugen der Geschichte dieses Nannoplanktons.

Der Name «Nannoplankton» geht auf das lateinische Wort *nanus* («Zwerg») zurück und bezieht sich auf die winzige Größe dieser Lebewesen. Ihre als «Nannofossilien» bezeichneten winzigen Versteinerungen wurden 1836 bei mikroskopischen Untersuchungen von dem deutschen Arzt und Naturforscher Christian Gottfried Ehrenberg (1795–1876) entdeckt, der sich intensiv mit Mikrofossilien beschäftigte. Etwa zwei Jahrzehnte später fand Thomas Huxley (1825–1895), Darwins Freund und Vorkämpfer, in rezenten Tiefseesedimenten des Atlantiks einen Typus von Lebewesen, die er als *Coccolithen* bezeichnete. Ihr Panzer besteht aus einem Ring kleiner Platten, die ein zentrales Loch umgeben, und Huxleys Zeitgenosse, Henry Sorby, entdeckte, daß die winzigen Schalen dieser Kleinlebewesen den Hauptbestandteil der Kreidefelsen Englands bilden. Im Laufe des nachfolgenden

Jahrhunderts beschrieben und klassifizierten zahlreiche Spezialisten immer mehr fossile Arten, doch Nannofossilien machten in wissenschaftlichen Blättern erst 1964 Schlagzeilen, als Bill Bramlette, der an der Universität von Kalifornien in Los Angeles mein Lehrer für Sedimentologie war, anhand der Daten, welche die Nannofossilien lieferten, nachwies, daß es auch im Bereich der Nannofossilien ein Massensterben gegeben hatte.

Während der Kreidezeit war das Nannoplankton durch eine Vielfalt von Arten vertreten. Helen Tappan, die nach Bramlettes Ausscheiden an der Universität von Kalifornien Mikropaläontologie lehrte, zählte mehr als 100 Arten. Bramlette und Tappan fanden aber, daß die mesozoischen *Coccolithen* am Ende der Maastrichtzeit so gut wie ausgerottet waren. Nur ein paar «unscheinbare» Arten waren am Leben geblieben. Aus diesen Überresten entwickelten sich ein paar Jahrmillionen später, gegen Ende des Daniums, ganz neue Arten. Aufs neue entstand eine artenreiche und blühende Nannoplankton-Population.

Das zeitliche Zusammenfallen des Nannoplankton-Aussterbens mit dem vieler anderer Gruppen von Organismen war für Helen Tappan vermutlich eine Sache von Ursache und Wirkung. Phytoplankton ist ihrer Meinung nach die Basis der Nahrungskette. Nach Schätzungen des Biologen H. W. Harvey benötigen 70 Tonnen planktonische Pflanzenfresser (z. B. *Foraminiferen*) 100 Tonnen Phytoplankton als Jahresernte. Die 70 Tonnen tierischen Planktons wiederum dienen etwa 4 bis 7 Tonnen Fischen als Nahrung, die ihrerseits den jährlichen Nahrungsbedarf eines Fleischfressers decken, der etwa 300 Kilogramm wiegt. Wenn die Produktion von Phytoplankton drastisch zurückginge, könnte dies eine Kettenreaktion auslösen, und der Zusammenbruch der Nahrungskette könnte zum Verhungern zahlreicher anderer Lebewesen führen.

Tappans Geschichte hatte zwei Haken. Erstens mogelte sie sich um den Hauptpunkt herum, wenn sie einer kärglichen «Phytoplankton-Ernte» die Schuld gab. Wie konnte es zu einer solchen «Mißernte» kommen? Tappan überlegte: Pflanzliches Plankton benötigt Nährstoffe und Vitamine. Vielleicht war der Vorrat an Nährstoffen ausgegangen, wie Bramlette vermutet hatte. Oder hatte es einen Vitaminmangel gegeben? Cobalamin, Thiamine und Biotin sind die Vitamine, welche die *Coccolithen* benötigen. Sie werden durch Bodenbakterien synthetisiert, von Flüssen in den Ozean gespült und dort von Meeresströmungen verteilt. Wenn es in dieser Kette einen Bruch gab, so konnte dies katastrophale Folgen haben. Doch überzeugte dieser Vorschlag nicht. Flüsse konnten nicht austrocknen oder blockiert werden, die Meeresströmungen konnten nicht zum Stillstand kommen – und die Bodenbakterien konnten nicht alle aussterben.

Noch ernster war ein weiterer Schnitzer. Große, im Ozean lebende Reptilien, die ebenso alt waren wie die Dinosaurier und sich von Fischen ernährten, wären vielleicht vor Hunger gestorben, wenn die Phytoplankton-Zufuhr nachließ, doch die Dinosaurier lebten an Land. Fleischfressende Dinosaurier fraßen pflanzenfressende und diese ernährten sich von an Land

wachsenden Pflanzen. Wenn also das Plankton in den Ozeanen an Ernährungsstörungen zugrunde ging, so hinderte dies die Dinosaurier keineswegs daran, sich der üppigen Vegetation an Land zu bedienen.

Wenn weder Pflanzengift noch Hunger die Ursache waren – was dann hatte die Dinosaurier umgebracht? Waren sie vielleicht an Kälte zugrunde gegangen? Viele Paläontologen neigen dieser Auffassung zu. Ihr Ausgangspunkt ist dabei die Feststellung der Paläobotaniker, daß das Erdklima im Laufe der letzten 100 Millionen Jahre eine Tendenz zur Abkühlung zeigte, die im Mesozoikum begann, als der Erdball noch warm war und fast von Pol zu Pol mit tropischen und subtropischen Wäldern bedeckt war. Seinen Tiefpunkt erreichte dieser Abkühlungstrend vor etwa zwei Millionen Jahren, als die Eiszeit begann. Als sich die Dinosaurier entwickelt hatten, war warmes Klima vorherrschend gewesen, und man behauptete, sie hätten sich der Klimaverschlechterung nur anpassen können, so lange diese ganz allmählich vor sich ging. Doch mehr und mehr gerieten sie dabei in eine Streßsituation. Die Grenze der Belastbarkeit war vor 65 Millionen Jahren erreicht, und die Dinosaurier starben an Unterkühlung.

Man griff diesen Gedanken nur zu gern auf, denn jeder hielt die Dinosaurier für kaltblütige Lebewesen wie andere Reptilien auch. Heute findet man große Krokodile, Pythonschlangen, Leguane und Schildkröten in warmen Klimazonen. Reptilien gemäßigter Klimate, wie kleine Schildkröten und Schlangen, sind klein genug, um sich tief einzugraben und auf diese Weise überwintern zu können. Für Dinosaurier aber gab es keine unterirdischen Bauten, wo sie sich hätten verkriechen können. Eine neue Untersuchung dieser Hypothese wirft jedoch viele neue Fragen auf, darunter nicht zuletzt die, ob wirklich *alle* Dinosaurier in tropischen und subtropischen Klimaten lebten.

In der Tat war dies nämlich nicht der Fall. Vielmehr waren beispielsweise Dinosaurier, die in höheren Regionen lebten, an Klimate angepaßt, wo man – nach den dort angesiedelten Gehölzen wie Ulme und Buche zu schließen, die im Herbst ihre Blätter verlieren – mit zumindest milden Wintern zu rechnen hatte. Einzig kleine Dinosaurier von Krähen- bis Katzensgröße entwickelten wärmeisolierende Federkleider, die ihre Nachkommen, die Vögel, von ihnen erbten. Dies gilt insbesondere für den *Pterosaurus*. Fliegende Reptilien, die keine Dinosaurier waren, besaßen sogar einen Pelz. Und immer mehr Paläontologen neigen zu der Auffassung, daß alle Dinosaurier bis zu einem gewissen Grade Warmblüter waren. Der führende Verfechter dieser neuen These ist Robert Bakker von der John-Hopkins-Universität. Nach seiner Ansicht waren die Dinosaurier warmblütige, energiegeladene Wesen, die keine Mühe hatten, sich warm zu halten.

Van Valen von der Universität Chicago, ein weiterer Saurier-Experte, war der Ansicht, es sei weniger die Kälte als das Verschwinden der tropischen Vegetation gewesen, das die Saurier umbrachte. Er führte seine Forschungen meist in Montana durch. Nach seiner Auffassung verschwanden, als die Winter immer strenger wurden, viele subtropische Pflanzen. Gewächse der

gemäßigten Zonen traten an ihre Stelle. Die Dinosaurier vertrugen die neue Pflanzenkost nicht. Überdies gab es nun mehr und mehr Bäume, die im Herbst ihr Laub verloren, so daß gerade in der kalten Jahreszeit keine Nahrung zur Verfügung stand. Tatsächlich kann die Ernährungsfrage zur Frage des Überlebens werden, wenn eine Tierart so wenig Auswahl hat wie etwa die südchinesischen Riesenpandas, die sich nur von einer ganz bestimmten Bambusart ernähren und daher auch «Bambusbären» genannt werden. Doch wenn es auch manche Dinosaurierarten gegeben haben mag, die nur eine Art von Sagopalme oder eine bestimmte Farnart verspeisten, so verzehrte doch die gesamte übrige Saurierschaft, was ihr in den Weg kam. Heute wissen wir: Manche Saurier kauten Holz, andere fingen Grashüpfer. Wieder andere weideten Nadelhölzer ab oder machten Jagd auf Opossums. Überdies pflegten weidende Herden dorthin zu ziehen, wo sich ihr Futter befindet. Sie handeln damit nicht anders als Raubtiere, die ihrer Beute nachziehen. Wenn sich also die Zone der tropischen und subtropischen Pflanzen nach Süden hin verlagerte – warum machten die Dinosaurier den Ortswechsel nicht einfach mit? Darüber hinaus galten die Futterprobleme der Dinosaurier in den gemäßigten Zonen sicher nicht für die in den Tropen lebenden Dinosaurier. Ein Kälteeinbruch, der die Dinosaurier in Montana umbrachte, mußte nicht auch so viele warmblütige Säugetiere und Vögel sowie sämtliche Reptilien im Meer umbringen – von Seeschildkröten ganz abgesehen.

Wenn es uns also schon schwerfällt, das düstere Bild erfrorener Dinosaurier nachzuzeichnen, so haben wir erst recht keinerlei Grund zu der Annahme, daß es durch einen mäßigen Rückgang der Meerestemperaturen zu einem Massensterben unter dem Meeresplankton kommen müsse. Wir befinden uns hier auf absolut tragfähigem Terrain, denn über die Temperaturschwankungen der letzten 65 Millionen Jahre seit dem Ende des Mesozoikums sind wir bestens informiert.

Geologische Studien der Klimaentwicklung während des Känozoikums lassen erkennen, daß es im Eozän vor 50 Millionen Jahren, am Beginn des Oligozäns vor 35 Millionen Jahren, im mittleren Miozän vor 14 Millionen Jahren, im späten Miozän vor 6 Millionen Jahren sowie im späten Pliozän vor 2,5 Millionen Jahren zu Temperaturstürzen kam. Die letzte dieser großen Temperaturveränderungen leitete das Zeitalter der Eiszeiten mit ihren drastischen Klimaschwankungen der Meerestemperatur zwischen Vereisungsphasen und warmen Zwischeneiszeiten ein. Keiner dieser Temperaturstürze hatte für die tierischen Bewohner des Ozeans katastrophale Folgen, und auch an Land riefen sie drastische Veränderungen von der Größenordnung des Dinosauriersterbens nicht hervor.

Earle Kauffman, ein Experte für die wirbellosen Meeresbewohner der Kreidezeit, besaß genug Erfahrung in der Paläontologie, um keine der eben geschilderten (und insgesamt etwas schlichten) Theorien wie Vergiftungs-, Hunger- oder Kältetod zu unterstützen. Als ich ihn 1981 in der *Smithsonian Institution* in Washington, D. C. besuchte, hielt er mir ein Privatkolleg in Paläontologie. Wir setzten unsere Diskussion bei einem Hummeressen fort,

kehrten dann aber in «sein» Museum zurück, um dort noch weiter zu debattieren. Kauffman erkannte nicht an, daß den vorliegenden geologischen Befunden zufolge am Ende der Kreidezeit ein Massensterben von Tierarten stattgefunden haben mußte (allerdings hat er inzwischen seine Ansicht geändert). Damals zog er eine gradualistische Hypothese vor (er ging davon aus, daß das Sauriersterben nach und nach stattgefunden haben mußte) und entwickelte ein äußerst komplexes Szenario, in dem ein klimabedingter Sauerstoffverlust der Ozeane eine Rolle spielte, und die Klimaverschlechterung ihrerseits dem Kommen und Gehen der See angelastet wurde.

In der frühen Maastrichtzeit überschwemmten die Meere das Land, und die Festlandsockel verschwanden unter Wasser. Derartige Meereseinbrüche (Transgressionen) bewirken im allgemeinen eher eine Klimaverbesserung, weil das Wasser weder extreme Hitzeentwicklung noch extreme Abkühlung zuläßt, sondern Wärme speichert. Nach Kauffman brachte dieser frühe maastrichtzeitliche Meereseinbruch einen massiven Sauerstoffverlust, der der reichen tropischen Tierwelt schadete, die auf dem Boden der flachen Kontinentalschelfmeere lebte. Dies war für ihn der Beginn des Massensterbens. Dann ging das Meer wieder zurück (es erfolgte also eine Regression), die Kontinentalsockel lagen wieder trocken, und das Klima wurde wieder kälter. Aber auch die Durchlüftung des kalten Meeres funktionierte nach Meinung Kauffmans aus nicht sehr klar erkennbaren Gründen schlecht. Der Sauerstoffgehalt sank jedenfalls weiter, und das Massensterben, das bereits während der Transgressionsphase (der Phase des Meereshochstandes und der Überschwemmung der Kontinentalsockel) begonnen hatte, erreichte am Ende der Maastrichtzeit seinen Höhepunkt.

Kauffmans Ideen schienen wohlüberlegt. Viele Paläontologen mochten die genialische Art seines eher impressionistisch «hinetupften» Bildes, das er entwarf. Doch unparteiische Beobachter konnten leicht einige Lücken erkennen. Eine einzige Frage reicht aus: Warum hatte ausgerechnet der Wechsel von Transgression (Überflutung) und Regression (zurückweichen-dem Meer) am Ende der Maastrichtzeit katastrophale Folgen noch nie dagewesenen Ausmaßes, während so viele andere Vorgänge dieser Art anscheinend keinerlei Spur in der Erdgeschichte hinterließen? Auch einen zweiten Einwand muß ich hier formulieren. Dinosaurier, die mitten auf den Kontinenten lebten, hatten schließlich nicht die mindeste Ahnung davon, daß das Meer auf die Küstenregionen übergriff und wieder zurückwich – oder daß dem Meerwasser der Sauerstoff ausging. Und warum sollten sie sich auch darum scheren? Es berührte sie einfach nicht im geringsten.

Viele Experten, die keine Probleme der Dinosaurier mit der Kälte sahen, haben die Frage aufgeworfen, wie gut sie wohl Hitze vertragen haben mochten. Tiere von riesigen Ausmaßen sind besonders für kalte Klimate geschaffen. Im Vergleich zu kleinen, schlanken Lebewesen haben sie weniger Körperoberfläche, um durch sie die in ihren massigen Leibern gespeicherte Wärme abzugeben. Daher zehren sie in kälterer Zeit von der Wärme, die sie mit ihrem eigenen Stoffwechsel erzeugen. Es ist also die Hitze, «das Verder-

ben der Fetten», die ihnen zu schaffen macht. Denn wirkungsvolle Wärmespeicherung ist ein Nachteil in einem Klima, das sich rapide aufheizt.

Dale Russell verglich einen 20-Tonnen-Dinosaurier mit einem Ball von 9 Quadratmetern Oberfläche. Wenn man davon ausgeht, daß dieser mächtige Dinosaurier wie heutige Reptilien ektothermisch gewesen ist (d. h.: von der Außentemperatur abhängig, «kaltblütig»), dann hätte seine stoffwechselbedingte Wärmeproduktion allein schon 557 Kilokalorien pro Stunde betragen. Der Sonne ausgesetzt, würde sich der Körper des Dinosauriers weiter mit Hitze aufladen. Wenn die Temperatur seines Umfeldes zwischen 20 und 25 Grad Celsius läge, kämen dann zu der durch den Stoffwechsel bedingten Wärmespeicherung noch 8100 Kilokalorien Sonnenenergie hinzu. Der Saurier erreichte eine Körpertemperatur von nicht mehr als 15 Grad Celsius über der Außentemperatur, was etwa der Norm (warmblütiger) Säugetiere entspräche. Stieg die Lufttemperatur aber auf 30 oder 40 Grad – etwa bei einer sommerlichen Hitzewelle –, so würden sich die großen Dinosaurier überhitzen, wenn sie nicht schnell Abkühlung im Schatten fänden.

Edwin Colbert, Kurator für Wirbeltier-Paläontologie an der *Smithsonian Institution*, fand, daß Alligatoren verenden, wenn die Temperatur ihrer Umwelt nur wenige Grade über die für sie optimale Außentemperatur steigt. Dies gilt auch für die verschiedenen Arten von Wüsteneidechsen, wie eine Studie von Colberts Mitarbeiter R. B. Cowles zeigte. Diese geringe Toleranz ist verständlich, weil kaltblütige, ektothermische Tiere über keine geeigneten Mittel und Wege verfügen, Körperwärme abzubauen.

Etwas komplizierter wird die Frage, ob große Dinosaurier Schwierigkeiten mit der Überhitzung ihres Körpers hatten, durch Robert Bakkers fundierte These, wonach die Dinosaurier Warmblüter waren. Wenn sie Endothermie («Warmblütigkeit») entwickelt hatten, hatten sie dann auch bessere Möglichkeiten, als man bisher annahm, durch Hecheln, Schwitzen oder gar «Erröten» angestaute Wärme abzubauen? Russell glaubte, daß auch warmblütige Dinosaurier große Probleme mit der Hitze gehabt hätten, weil sie vermittels ihres Stoffwechsels viel mehr Wärme erzeugen als «kaltblütige» Tiere.

Dewey McLean, ein Mikropaläontologe, dessen weitgespannte Interessen im Bereich der biologischen Wissenschaft seine Phantasie weit über die Grenzen seines eigentlichen Forschungsgebietes hinaus anregten, veröffentlichte 1978 hierüber einen Artikel in der Zeitschrift *Science*. Darin verfocht er das Argument, die Dinosaurier seien in einem «tödlichen mesozoischen Treibhaus» zugrundegegangen.

McLean prüfte die Belege dafür, daß Reptilien notorisch unfähig seien, Hitze zu ertragen, und suchte Begründungen für die unorthodoxe These, daß nicht fallende, sondern steigende Temperaturen das Dinosauriersterben ausgelöst hätten. Riesige Dinosaurier und andere große Reptilien, gleich, ob sie kalt- oder warmblütig waren, hätten, so behauptete er, einen Hitzschlag bekommen, sobald die Lufttemperatur nur 10 Grad Celsius über normal anstieg.

Doch sogar schon geringfügigere Temperaturerhöhungen haben möglicherweise ihre Fortpflanzungsfähigkeit beeinflusst. Beispielsweise zitierte McLean Forschungsberichte über männliche Unfruchtbarkeit infolge überhitzter Spermien, die schon bei leichten Temperaturerhöhungen nicht mehr lebensfähig sind, desgleichen Berichte über den Hitzestreß bei Hühnern, der dazu führt, daß Hennen außergewöhnlich zerbrechliche Eier legen. Daß die jüngsten Dinosauriereier, die gefunden wurden, meistens schadhafte Schalen hatten, ist zu belegen. Ferner fand man auch Eier, die nicht befruchtet (also steril) waren.

Um jedoch eine so lang anhaltende Hitzewelle zu erklären, mußte McLean wie so viele andere vor ihm zu der These einer Plankton-«Mißernte» Zuflucht nehmen. Das heißt nicht, daß das von ihm entworfene Szenario nicht einleuchtend gewesen wäre, denn er vertrat die Auffassung, daß nach dem Massensterben des Phytoplanktons im Ozean das Kohlendioxyd, das diese Pflanzen normalerweise mittels der Photosynthese verbrauchen, in die Atmosphäre abgegeben worden sei. Auch 1978 wußte man schon, daß Kohlendioxyd wie das Glas in einem Gewächshaus wirkt und Wärme festhält, die normalerweise in den Weltraum entweichen würde, so daß die Temperatur weltweit steigt.

Doch all diese Erklärungen haben einen Haken: Sie beginnen mit einem Ergebnis, das am meisten der Erklärung bedarf: mit dem Aussterben des Planktons ganzer Ozeane. Wie es zu diesem Massensterben kommen konnte, wurde erst später geklärt. Inzwischen konnte man bei der Untersuchung der Frage, wie das Wetter vor 65 Millionen Jahren wirklich war, und wer den Urzeit-Lebensformen den Garaus gemacht hatte, zumindest zwischen klirrendem Frost und Backofenluft wählen.

Zeugnisse aus der Tiefe

Als ich an der Universität von Kalifornien in Los Angeles studierte, begann ich mit den Recherchen für meine Dissertation bei dem bekannten Geophysiker David Griggs. Sein «Hausheiliger» war Sir William Thomson (1824–1904), der besser als Lord Kelvin of Largs bekannt ist. An der Tür des Griggs'schen Büros hing ein Zitat aus Kelvins Schriften:

Ich sage oft, daß man dann, wenn man messen und in Zahlen ausdrücken kann, worüber man spricht, etwas darüber weiß. Kann man es jedoch nicht in Zahlen ausdrücken, dann ist das Wissen darüber kärglich und unbefriedigend. Es mag der Beginn des Wissens sein, doch man ist in seinem Denken kaum bis zum Status der Naturwissenschaft vorgedrungen, worum immer es auch gehen mag.

Eine weitere Weisheit, die man Lord Kelvin zuschrieb, war schlichtweg beleidigend. Er soll geäußert haben, es gäbe Naturwissenschaftler – er meinte Physiker –, die ihr Wissen in Zahlen ausdrückten, und daneben «Briefmarkensammler». Zu den Letztgenannten zählte Kelvin Biologen, Geologen und andere Naturforscher, die nach Kelvins Überzeugung nur an Einzelobjekten interessiert seien.

Doch ganz abgesehen von Kelvins Arroganz – er hatte einen wesentlichen Punkt getroffen: Quantifikation ist notwendig, um Ideen zu verifizieren. Russell und andere waren von der Annahme ausgegangen, die Dinosaurier hätten keine Lebenschance gehabt, wenn die Lufttemperatur plötzlich um 10 Grad Celsius angestiegen wäre. McLean hatte vermutet, genau so hoch sei der Temperaturanstieg am Ende der Kreidezeit gewesen, doch er verfügte über keinerlei Zahlenmaterial. De Laubenfels zufolge starben die im Meere lebenden Reptilien bei einer Hitze, die das Wasser fast zum Sieden brachte, doch er hatte nicht den geringsten Anhaltspunkt für einen siedenden Ozean. Auch die Anhaltspunkte für die Abkühlung waren mager: Bei einem Trend, der 100 Millionen Jahre anhält, konnte man nicht zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Temperatur angeben.

Wir hielten uns in aller Regel an Paläontologen, um uns über das Klima in der Vergangenheit zu informieren. Pflanzen sind sensible Indikatoren ihrer Umwelt. Manche fossilen Pflanzen sind bis in die Gegenwart hinein vertreten, und wir können davon ausgehen, daß ihr Umfeld in der Vergangenheit ähnlich beschaffen war wie heute. Beispielsweise entdeckte man schon im Mesozoikum vorhandene fossile Palmen in der Wüste von Arizona, woraus

zu schließen ist, daß das dortige Klima vor 250 Millionen Jahren nicht anders war als heute. Andere Pflanzen sind allerdings ausgestorben, und wir können nur von ihren heutigen Verwandten Rückschlüsse auf die Verbreitung der fossilen Arten ziehen. Allerdings können wir unserer Interpretation auch die Pflanzenmorphologie zugrunde legen. Beispielsweise gedeihen Pflanzen mit großen Blättern vorzugsweise in den Tropen oder Subtropen. Nadelbäume oder Leguminosen (Hülsenfrucht-Gewächse) sind dagegen häufiger in gemäßigteren oder trockeneren Regionen anzutreffen. Auch Tiere haben ihre bevorzugten Lebensräume. Korallen errichten ihre Bauten in den Tropen, Seehunde und Walrosse dagegen bevorzugen Polarmeere. Ein weiteres Kriterium ist die Vielfalt. Unter optimalen Klimabedingungen findet man eine große Zahl von Arten, doch nur ein paar besonders widerstandsfähige halten strenge Kälte oder andere Belastungen aus. Auf diese Weise waren Paläontologen imstande, Tierverbreitungs-«Provinzen» vergangener Zeit zu rekonstruieren und sie Klimazonen zuzuordnen.

Auch die Verteilung einzelliger Organismen im Ozean ist an Klimazonen gebunden. Einzellige Organismen bezeichnet man heute als *Protisten*, denen man ein eigenes Reich unter den Lebewesen, neben dem Tier- und Pflanzenreich, zuspricht. Zu den *Protisten* gehören Lebewesen, die man einst als einzellige Tiere betrachtete, wie die im Meere «weidenden» *Foraminiferen*, desgleichen die einzelligen Pflanzen – wie zum Beispiel das abgeweidete Nannoplankton. Bei *Foraminiferen* und Nannoplankton kann man durchaus Arten, welche die Tropen bewohnen, von Bewohnern mittlerer und höherer Breiten unterscheiden. *Radiolarien* (Strahlentierchen) mit zierlichen, glasartigen Skeletten, die wie kleine Juwelen aussehen, kommen überreichlich im äquatorialen Pazifik vor, wogegen *Diatomeen* (Kieselalgen), aus deren rauen, aus Kieselsäure bestehenden Pektinpanzern man Reinigungsmittel herstellt, besonders in Polarmeeren vorkommen.

Das Studium der klimabedingten Fossilienverbreitung bezeichnet man als Paläoökologie. Schon seit mehr als einem Jahrhundert ist diese Wissenschaft auf der Suche nach Methoden, die Klimaveränderungen der Vergangenheit zu erforschen. Ihre Fachsprache verwendet beschreibende Ausdrücke wie «warm» und «kalt», «tropisch» und «gemäßigt», um grobe Unterschiede in den Temperaturen der Lebensräume zu kennzeichnen, in denen die verschiedenen fossilen Organismen lebten. Unser Vertrauen in die Arbeit der Paläoökologen beruht darauf, daß sie auf verschiedenen Wegen zu Resultaten gelangten, die schließlich zu übereinstimmenden Schlußfolgerungen führten. Beispielsweise fanden sie in Meeren, die nahe bei Ländern mit tropischer Flora Kontinentalsockel überspülten, oder in der Nähe offener Ozeane, in denen äquatoriale *Protisten* gediehen, eine große Diversität an Arten und Formen. Als nichtpaläontologische Methoden entwickelt wurden, fanden auch viele paläontologische Folgerungen ihre Bestätigung. Zum Beispiel kann die Inklination des remanenten Magnetismus Hinweise auf die geographische Breite geben und somit bestätigen, daß eine fossile Assemblage, die den Eindruck erweckt, aus der Nähe des

Äquators zu stammen, wirklich aus der Äquatornähe herrührt und daher «tropisch» war.

Ein Nachteil des paläoökologischen Ansatzes ist allerdings, daß er keine Zahlen liefert. Die meisten Paläoökologen benutzen Ausdrücke wie «warm», «relativ warm», «wärmer» oder «sehr warm». Aber was einer als «warm» empfindet, mag für einen anderen schon «sehr warm» sein. Oft greift man auch zu paradoxen Ausdrucksweisen: «Tropische Faunen» waren vielleicht nicht Tierwelten, die tatsächlich in der Nähe des Äquators lebten, sondern Tierwelten, die zu einer Zeit, als das Klima weltweit sehr warm war, in verhältnismäßig hohen Breiten lebten. Tatsächlich war die Präzision, die nötig war, irgendeine der gängigen Hitze- oder Kältetheorien abzustützen, die das Massensterben begründen sollten, von solcher Art, daß der paläoökologische Ansatz vollkommen zusammenbrach. Über die Frage des Endklimas der Kreidezeit gerieten die Paläoökologen in fruchtlose Streitigkeiten. Doch ob das Klima wärmer oder kälter geworden war, wußte niemand mit Sicherheit.

Die Technik, die es uns schließlich ermöglichte, die Temperatur vorzeitlicher Klimate zu messen – sozusagen das «Paläothermometer» – war tatsächlich schon zwanzig Jahre lang angewandt worden, als McLean seine «Treibhaustheorie» entwickelte, um das Ende der Dinosaurier zu erklären. Allerdings waren seine Ergebnisse sehr verwirrend. Manchmal dauert es einfach relativ lange, bis ein neu eingeführtes Instrumentarium Resultate mit der gewünschten Genauigkeit erzielt.

Die Methode entwickelte sich aus der Erforschung der Isotope, welche die radiometrische Datierung ermöglicht hatte. Ursprünglich hatte man angenommen, daß die Zusammensetzung der verschiedenen stabilen Isotope eines chemischen Elements – Isotope, die für die radiometrische Datierung unbrauchbar sind, weil sie nicht radioaktiv zerfallen – überall und unter allen Umständen die gleiche sei. Doch schon früh in den dreißiger Jahren unseres Jahrhunderts glaubte Harold Urey, daß der Wasserstoff mehr als ein Isotop hat. Es muß daher möglich sein, in einer Probe die schweren Isotope dieses Elementes anzureichern. Gewöhnliche Wasserstoffatome besitzen nur ein Proton und repräsentieren das leichteste Isotop dieses Elementes mit dem Atomgewicht 1. Wasserstoffatome mit einem Proton und einem Neutron haben das Atomgewicht 2. Leichtere Atome sind relativ agil. Verdunstet eine Flüssigkeit, in der sie enthalten sind, zeigen sie die Tendenz, sich «selbständig zu machen» und zu verflüchtigen. Wird aber die verdampfte Flüssigkeit kondensiert, stehen für schwerere Atome des Wasserstoffs, die mit einem oder mehreren Neutronen befrachtet sind, die Chancen besser, wieder zur Flüssigkeit zu werden. Man brauchte also nur eine Flüssigkeit zu verdampfen, dann wieder zu kondensieren und dies mehrere Male zu wiederholen, um eine mit den Atomen des schweren Isotops angereicherte Restflüssigkeit zu erhalten, falls ein schweres Isotop überhaupt existierte. Also ließ Urey sechs Liter flüssigen Wasserstoffs verdampfen und konnte mit Hilfe eines Massenspektrographen nachweisen: Die Restflüssigkeit war tatsächlich mit

Wasserstoffatomen angereichert, die das Atomgewicht 2 besaßen. Somit war der Nachweis erbracht, daß es ein schweres Wasserstoffisotop gab, dem man den Namen *Deuterium* gab – dies wegen seines doppelten Atomgewichts –, und Urey erhielt für seine Entdeckung den Nobelpreis.

Deuterium hat das Atomgewicht 2, weil sein Kern zusätzlich zu dem Proton auch noch ein Neutron enthält. Schließlich wurde auch noch ein drittes Wasserstoffisotop, das *Tritium*, entdeckt. Es hat zwei Neutronen. Deuterium ist ein stabiles Isotop, Tritium dagegen ist radioaktiv. Auch andere sehr verbreitete Elemente haben Isotope. Kohlenstoff beispielsweise hat Kohlenstoff 12, Kohlenstoff 13 und Kohlenstoff 14. Kohlenstoff 14 ist radioaktiv und ermöglicht es uns, kohlenstoffhaltiges Material radiometrisch zu datieren. Sauerstoff hat Sauerstoff 16, Sauerstoff 17 und Sauerstoff 18 – alles stabile Isotope, die nicht in Tochterprodukte zerfallen und deshalb für die radiometrische Datierung ungeeignet sind.

Alle Isotope lassen sich jedoch fraktionieren, so wie Urey Wasserstoff in seine schweren und leichteren Isotope fraktionierte. Nachdem er im Zweiten Weltkrieg mit Uranisotopen Fraktionierungsexperimente für das Manhattanprojekt durchgeführt hatte, kehrte er zur Grundlagenforschung zurück und dachte darüber nach, wie es in der Natur zur Fraktionierung stabiler Isotope gekommen sein könnte und welche Konsequenzen sich daraus ergäben.

Das verbreitetste Isotop des Sauerstoffs, Sauerstoff 16, enthält in seinem Kern acht Protonen und acht Neutronen und stellt 99,756 Prozent der Sauerstoffatome. Sauerstoff 17 verfügt über noch ein Neutron mehr, Sauerstoff 18 sogar über zwei. Ihre Prozentzahlen sind 0,039 beziehungsweise 0,205. Wenn Sauerstoff mit anderen Elementen eine chemische Verbindung eingeht, enthält auch der Sauerstoff innerhalb dieser Verbindung einen geringfügigen Anteil der schwereren Isotope. Den Prozentsatz dieser unterschiedlichen Isotope in der betreffenden Verbindung bezeichnet man als Sauerstoffisotopen-Komposition. In aller Regel sind die Sauerstoff-17-Atome so spärlich, daß sie kaum genau meßbar sind. Bei der Angabe der Isotopenkomposition des Sauerstoffs beschränkt man sich daher auf die Angabe des Verhältnisses des schwersten zum leichtesten Isotop, des Sauerstoffs 18 zum Sauerstoff 16.

Die bekannteste Wasserstoff-Sauerstoff-Verbindung ist Wasser (H_2O). Es enthält das gewöhnliche Verhältnis von leichtem Wasserstoff zu seinem schweren Deuteriumisotop, aber auch alle drei Sauerstoffisotope. Das Wasser im offenen Meer ist in solchem Maße homogenisiert, daß in ihm das Verhältnis von Sauerstoff 16 zu Sauerstoff 18 praktisch überall gleich ist. Man benutzt es daher als Standardmaß und leitet sogar den Ausdruck für dieses Maß («mittlerer Standard des Ozeanwassers», englisch: *Standard Mean Ocean Water*, abgekürzt: SMOW) davon ab. Wolken dagegen gleichen dem Wasserdampf bei den Experimenten, die Urey mit flüssigem Wasserstoff unternahm, um durch wiederholtes Verdampfen und Wiederverflüssigungen die schweren von den leichten Isotopen zu trennen. Die Wolken haben geringere Anteile des schweren Sauerstoff-18-Isotops als das Meerwasser, dessen Ver-

dunstungsprodukt sie sind. Bei Sauerstoffverbindungen mit weniger Sauerstoff 18 als dem Standard des mittleren Ozeanwassers spricht man von einer *negativen* Sauerstoffanomalie in bezug auf SMOW. Doch nicht nur Wolken weisen diese negative Sauerstoffanomalie auf, auch Regen und Schnee, die aus den Wolken fallen, und schließlich Seen und Flüsse, die aus Regenwasser und geschmolzenem Schnee gespeist werden. Im Zusammenhang mit Verbindungen, die mehr Sauerstoff 18 als SMOW enthalten, spricht man dagegen von einer *positiven* Sauerstoffanomalie.

Urey berichtete 1946 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule von seiner Entdeckung. Paul Niggli, der damals Professor für Mineralogie war, sah sofort die Anwendungsmöglichkeiten für geologische Zwecke. Viele Jahre lang hatten die Geologen Schwierigkeiten gehabt, zwischen Kalksteinsedimenten aus Süßwassern und solchen aus dem Ozean zu unterscheiden. Kalkstein (Kalziumkarbonat, CaCO_3) enthält Sauerstoff, und dieser Sauerstoff stammt aus dem Wasser, in dem sich der Kalkstein bildete. Wenn Süßwasser im Verhältnis zu SMOW eine negative Sauerstoffanomalie aufweist, müssen auch Kalkgesteine, die sich in einem See gebildet haben, im Vergleich zu ozeanischen Kalkgesteinen weniger Sauerstoff 18 aufweisen. Schließlich wählte man eine fossile Muschel aus Meereskalkstein, und zwar aus der sogenannten Pee-Dee-Formation in Nordkarolina (Pee-Dee-Belemniten, oder PDB) zum Standardmaß, das den Vergleichswert lieferte, der eine Bestimmung von Kalksteinablagerungen unbestimmten Ursprungs ermöglichte.

Mag sein, daß die Bemerkung, die Niggli nach Ureys Vortrag gemacht hatte, Ureys Leben eine ganz andere Richtung gab. Bisher Chemiker, wandte er sich nun den Geo- und Astrowissenschaften zu. Seine erste wissenschaftliche Tat im Rahmen seiner neuen Karriere war die Entwicklung einer Methode, die Isotopenkomposition der Kalziumkarbonate als «Paläothermometer» zu nutzen, mit dem man messen konnte, wie warm die Urzeit-Ozeane waren. Eine theoretische Analyse zeigte, daß die Temperatur, bei der dieses Mineral kristallisierte, das Häufigkeitsverhältnis seiner Sauerstoffisotope beeinflusste, auch wenn sämtliche Kristalle unter absolut gleichen SMOW-Bedingungen ausgefällt wurden. Höhere Wassertemperaturen führten zu einer Fraktionierung zugunsten des beweglicheren, agileren und leichteren Isotops. Schwererer Sauerstoff 18 war daher in Kristallen seltener anzutreffen, die aus wärmeren Meeren stammten. Berechnungen, die Urey und sein Schüler J. M. McCrea anstellten, führten zur Erstellung einer Temperaturskala der Urzeitmeere. Die Wertunterschiede waren groß genug, um mit den Massenspektrographen, über die man seinerzeit schon verfügte, gemessen werden zu können.

Da Meeresmuscheln aus Kalziumkarbonat bestehen, das aus dem Meerwasser stammt, folgerte Urey, die Isotopenzusammensetzung einer fossilen Muschel könne ein Indikator für die Temperatur des urzeitlichen Ozeans sein, in dem die betreffende Muschelschale entstand.

Mit seiner theoretischen Prämisse zufrieden, unterstützt von einem jungen Paläontologen namens Heinz Löwenstam und mit einem Forschungsstipendium der Amerikanischen Geologischen Gesellschaft im Hintergrund, begab sich Urey auf die Fossiliensuche und fand, daß sich *Belemniten* am besten als «Paläothermometer» eignen.

Belemniten werden vom deutschen Volksmund «Donnerkeile» oder «Teufelsfinger» genannt, weil ihre zylindrischen Gehäuse an einen Finger erinnern. Urey wählte den «Teufelsfinger», weil seine Originalskelette normalerweise erhalten sind, wogegen viele andere Fossilien aus Mineralien bestehen, die nachträglich das ursprüngliche Material ersetzen. Die erste Messung nahm er an einer Probe vor, die aus einer jurassischen Formation in England stammte. Die Materialprobe hatte einen Durchmesser von 2,5 Zentimetern. Sie war von bräunlicher Farbe und lichtdurchlässig. Als man einen Schnitt anfertigte, konnte man Wachstumsringe erkennen, die sich deutlich abzeichneten. Proben von 24 Ringen wurden analysiert, und die Sauerstoffanomalien bewegten sich in Grenzen, die den Eckwerten von 14 bis 20 Grad Celsius entsprachen. Diese Temperaturunterschiede legten die Vermutung nahe, daß der jurassische Schwimmer nach seiner Jugend drei Sommer und vier Winter gelebt hatte und im Frühjahr darauf gestorben sein muß, als er vier Jahre alt war.

Das Britische Museum versah das Team aus Chicago mit *Belemniten*, Austern und *Brachiopoden* (Armfüßern) aus der mittleren und jüngeren (oberen) Kreidezeit Englands. Das Museum der Universität Kopenhagen stiftete drei *Belemniten*-Specimina aus der Maastrichtphase. Das jüngste dieser Stücke war 17 Meter unter der Oberfläche der Kreideschicht gefunden worden. Der betreffende *Belemnit* hatte also etwa eine Million Jahre vor dem Ende der Kreidezeit gelebt. *Belemniten* und Austern gewann man auch aus weitverstreutem anstehendem Felsgestein in den Vereinigten Staaten in Mississippi, Tennessee, Nordkarolina sowie aus der Pee-Dee-Formation Südkarolinas, aus der das Standardmaß für den Kalkstein stammte. Die Proben aus England deuten auf einen Temperaturabfall von etwa 23 auf 14 Grad Celsius am Ende der Kreidezeit hin. Die in Amerika entnommenen Proben aus südlicheren Breiten brachten einige ähnliche Werte, aber keinen klaren Trend.

Obwohl Ureys Datenmaterial fragmentarischen und vorläufigen Charakter hatte, ließ er doch diese erste Gelegenheit nicht ungenutzt, sich in die Auseinandersetzung um das Dinosauriersterben einzuschalten. In einem Artikel, den er zusammen mit seinen Kollegen im *Bulletin of the Geological Society of America* veröffentlichte, äußerte sich Urey im Sinne der Hypothese, daß die Dinosaurier den Kältetod erlitten hätten. Vermutlich hatte er eine Vorahnung, daß, obwohl er aus jeder Zone nur über einzelne Proben verfügte, mehr Datenmaterial dennoch einen klaren Trend zur Abkühlung zeigen würde. Damit hatten die Anhänger der Kältetod-Hypothese die erste Runde gewonnen.

Ureys Schüler Heinz Löwenstam und Sam Epstein setzten 1954 die Arbeit ihres Lehrers fort, trieben jedoch systematischere Forschungen und

arbeiteten mit Probenmaterial aus Schweden, Dänemark, England, Holland, Belgien, Frankreich, Algerien, Indien, Japan, Australien und den Vereinigten Staaten. Ihre «mittleren Belemniten-Durchschnittstemperaturen» gingen bis zu 15 Grad Celius hinab, und zwar während des Cenoman, einer etwa 100 Millionen Jahre zurückliegenden Epoche ziemlich genau in der Mitte der Kreidezeit. Dann erreichten sie ein Maximum von 20 Grad Celsius, bevor sie während der Maastrichtphase auf ein neues Minimum fielen. Also griffen Löwenstam und Epstein auf ihre früheren Folgerungen zurück, daß es «keinerlei Anhaltspunkte für einen bedeutenden Temperaturanstieg» gäbe, der als Ursache des Dinosauriersterbens in Frage komme. Andererseits aber hatten die Dinosaurier vor 100 Millionen Jahren das kühle Cenoman-Wetter überlebt. Löwenstam und Epstein sahen daher auch keinen Grund, die Abkühlung vor 65 Millionen Jahren für ihr Aussterben verantwortlich zu machen, «wenn diese nicht mit anderen Faktoren in Verbindung stand, die erst noch geklärt werden müssen».

Die Zahlen aus Chicago fanden nicht überall Zustimmung. Paläontologen alter Schule benutzten paläontologische Argumente, um den Wert des «Paläothermometers» in Frage zu stellen. Sie wiesen darauf hin, daß während beider Epochen, obwohl diese als «kühl» angesehen wurden, die Vielfalt der Riffkorallen, der tropischen Weichtiere und der großen *Foraminiferen* zugenommen habe. Ökologisch gesehen, müßten also in beiden Epochen eher hohe als zu niedrige Temperaturen geherrscht haben. Die beiden Wissenschaftler erwogen auch die Möglichkeit, daß Meeresorganismen wählerisch waren und sich irgendwie aussuchten, welche Isotope sie zum Bau ihrer Gehäuse verwendeten. Wenn *Belemniten* für den Bau ihrer Gehäuse das schwerere Isotop dem leichteren vorzogen, dann wiesen sie den an sich für kaltes Wasser typischen höheren Anteil an Sauerstoff 18 auf, selbst wenn sie in Wirklichkeit in einem warmen Meer lebten. Dieser mögliche «Vitaleffekt» blieb zweifelhaft; die zweite Runde ging also an die Theoretiker des Wärmetodes.

Für eine Weile blieb der Streit unentschieden. Kein weiteres Belegmaterial tauchte auf, das sich im Sinne der einen oder anderen Hypothese hätte interpretieren lassen. Es gab keinen eindeutigen Anhaltspunkt dafür, ob sich das Klima während der letzten 10 oder 20 Millionen Jahre der Kreidezeit erwärmt oder abgekühlt hatte.

Auch Daten aus dem frühesten Känozoikum waren nicht verfügbar, weil *Belemniten*, wie immer die Wetterbedingungen auch gewesen sein mögen, einfach das Ende des Mesozoikums nicht überlebten. Löwenstam und Epstein analysierten andere Fossilien aus den Formationen der Maastrichtzeit und des Daniums, fanden jedoch keine nennenswerten Unterschiede in der Zusammensetzung der Sauerstoffisotope. Mehr noch, die Überreste von Organismen, die sonst durchaus aussagekräftig sind, weil sie wie Armfüßer (*Brachiopoden*) überall vorkamen und weit verbreitet waren, haben sich im Laufe der Jahrmillionen in ihrer mineralischen Zusammensetzung geändert und «senden» nunmehr ganz andere Isotopensignale. Man findet sie in

ozeanischem Kalkgestein und in Kreideformationen, die später zu Land wurden. Dort veränderte das Grundwasser ihre chemische Zusammensetzung, als sie sich aus lockeren Sedimenten in Felsgestein verwandelten. Diese Schwierigkeit, die geeigneten Fossilien zu finden, war viele Jahre lang ein ernstes Hindernis für die allgemeine Anwendung von Ureys' «Paläothermometer».

Sedimente im offenen Meer wurden nie auf einen Kontinent emporgehoben. Ozeanographen, die dem Meeresboden Proben entnahmen, fanden in ihrem Material Originalskelette von *Foraminiferen* und Nannoplankton. Es waren die Tiefseesedimente, die das Versprechen einlösbar machten, sicher zu bestimmen, ob sich der Ozean gegen Ende der Kreidezeit erwärmt oder abgekühlt hatte. Doch 65 Millionen Jahre alte Sedimente findet man nicht allzu häufig auf dem Meeresgrund. Sie liegen vielmehr Hunderte von Metern tiefer – weit unter den Ablagerungen, die sich in den Jahrillionen seither dort angesammelt haben.

Im Sommer 1958 befand ich mich auf einer Dienstreise in Miami, und mein Freund, Bob Ginsburg, arrangierte ein Essen, um mich mit Cesare Emiliani bekanntzumachen, der stets voller Ideen war.

Damals war unter Geowissenschaftlern eine erbitterte Debatte im Gange. Eine bahnbrechende technische Neuerung, die es ermöglichte, ein Schiff genau in Position zu halten, hatte es den Forschern endlich ermöglicht, in den Tiefseeboden Löcher zu bohren.

Normalerweise benutzt man eine ortsfeste Plattform mit in den Meeresgrund gerammten Pfeilern, wenn man auf offener See den Meeresboden anbohren will. Erdölvorkommen vor der Küste des Golfes von Mexiko oder in der Nordsee beutet man auf diese Weise aus. Allerdings kann man in einen 5000 Meter unter dem Meeresspiegel gelegenen Tiefseeboden keine Pfeiler rammen. Es würde sich nicht empfehlen, selbst wenn es technisch möglich wäre.

Ein dynamisch in Position gehaltenes Schiff dagegen ist in keiner Weise am Meeresgrund festgemacht. Vielmehr wird es von einem Computer ortsfest gehalten, der vier Maschinen steuert, durch die das Schiff mit ständigen Korrekturen gegen die Abdrift genauer an seinem Platz gehalten wird als durch jedes Haltetau. Als diese technische Neuerung erst einmal bekannt wurde, machte sich jeder, der im Bereich der Geowissenschaften Rang und Namen hatte, auf, um ein 5 Kilometer tiefes Loch, das sogenannte *Mohole*, in die Erdkruste unter den Ozeanen zu bohren (um zu der sogenannten *Mohorovicic-Diskontinuität* vorzustoßen, daher die Abkürzung *Mohole* [«Mohorovicic-Loch»]), ganz so, wie vielleicht das eine oder andere Kind in Amerika davon träumen mag, in China ein Erdloch in den Boden zu buddeln. Viele Millionen hatte man schon für dieses Vorhaben ausgegeben, und noch viel mehr forderte man vom Kongreß der Vereinigten Staaten.

Emiliani war wütend, daß man für ein Projekt Geld zum Fenster hinauswarf, das ihm keinerlei Nutzen und Sinn zu haben schien (womit er recht

hatte, wie sich herausstellen sollte). Er hielt es für sehr viel sinnvoller, ein paar weniger tiefe Bohrlöcher in den Tiefseeboden zu treiben, um aussagekräftige Proben für die Untersuchung der Klimaschwankungen während der Eiszeiten zu gewinnen.

Emiliani war an der Universität Bologna zum Paläontologen ausgebildet worden. Er war stolz auf sein Land und seine Alma Mater und ließ keine Gelegenheit ungenutzt, von der Schönheit der Toskana oder von seiner Universität zu schwärmen, die den Anspruch erhebt, die älteste Universität der Welt zu sein. In Bologna hatte Emiliani über planktonische *Foraminiferen* gearbeitet. Nach dem Zweiten Weltkrieg erhielt er eine Berufung zu wissenschaftlichen Forschungsarbeiten an die Universität Chicago, wo Harold Urey versuchte, sein in seinen Anwendungsmöglichkeiten noch immer sehr eingeschränktes «Paläothermometer»-Prinzip in größerem Rahmen anwendbar zu machen. Damals untersuchte Urey Tiefseesedimente, doch stammte das Material seiner Sedimentproben nicht aus so tief unter dem Meeresboden gelegenen Schichten, daß es sich um Material aus der Grenzzeit zwischen Mesozoikum und Känozoikum handeln konnte.

Tiefseesedimente sind Kalkschwämme aus den Skeletten von *Foraminiferen* und Nannoplankton, die man mit dem englischen Wort *ooze* (wörtlich: «Sickerschlamm», «Schlicker») bezeichnet, weil sie aus der Hand sickern, wenn man sie zu fassen versucht. Urey war entmutigt. Zu den fossilen Foraminiferen in seinen Proben gehörten ebenso Exemplare, die auf dem kalten Meeresboden gelebt hatten, wie solche, die einst im warmen Oberflächenwasser herumgeschwommen waren. An verschiedenen Stellen entnommene Stichproben enthielten unterschiedliche Mischungen der beiden Gruppen, so daß Urey sich außerstande sah, zu sinnvollen Resultaten zu gelangen. Um aufgrund dieser Schlammproben eine Temperaturanalyse zu erstellen, mußte er die Warmwasser-Planktontierchen von den Kaltwasser-Meeresbodenbewohnern trennen. Ein Chemiker aber kann das nicht. Wenn man über keine Sonderausbildung und über keine Erfahrung mit Plankton verfügt, sehen diese winzigen Kreaturen alle gleich aus. Als daher Emiliani als Spezialist in Chicago auftauchte, wurde er sofort von Urey und seiner Gruppe mit Beschlag belegt. Emiliani war in der Lage, eine Foraminiferenart von der anderen zu unterscheiden, und er brachte der Gruppe um Urey die Hilfe, die sie für die Auswertung der aus der Tiefe erhobenen Befunde im Hinblick auf das Klima der Urzeit brauchten.

Damals hatte man sich lediglich mit dem Klima des Eiszeitalters befaßt, das vor etwa 2 Millionen Jahren begann und vor etwa 10 000 Jahren endete. Albrecht Penck, ein Geograph, der sich intensiv mit dem Studium der Geländeformen beschäftigte und viele Tage seiner Jugend in den bayerischen Bergen verbrachte, wo an Gletschern kein Mangel ist, erkannte als erster, daß es seinerzeit nicht nur eine einzige Kälteperiode auf dem Kontinent gegeben hatte. Vielmehr mußte eine Folge von Klimaschwankungen stattgefunden haben, in deren Verlauf die Gletscher auf dem Kontinent teils vorgerückt

waren, teils sich wieder zurückgezogen hatten. Penck, der während der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts in Süddeutschland arbeitete, stellte fest, daß heutige Wasserläufe leicht in Tälern mäandrieren, unter denen Kiesschichten lagern. Er folgerte daraus, daß heutige Wasserläufe nicht genug Kraft besäßen, um solche Art von Geröll zu transportieren, sondern daß dermaßen grobkörniger Schutt von viel stärkeren Schmelzwasserläufen zu Tale befördert worden sein müsse, die von Gletschern der Eiszeit herrührten. Außerdem erkannte Penck, daß unter den Flußterrassen beiderseits eines Tales Kiesschichten gleichen Typs abgelagert waren wie in den jüngeren Talschichten aus der Jetztzeit. Diese Kiese müssen in früheren Phasen der Eiszeit auf solch höherem Niveau abgelagert worden sein. Weil er in diesen Terrassen vier unterschiedliche Ebenen erkannte, postulierte er, es müsse vier Phasen gegeben haben, in denen die Gletscher vordrangen. Er bezeichnete diese Phasen nach den Namen der Flüsse, an denen er seine Beobachtungen gemacht hatte, als Günz-, Mindel-, Riß- und Würm-Eiszeit. Zwischen diesen Vergletscherungsphasen (*Glazialen*) lagen Zwischeneiszeiten (*Interglaziale*), in denen es so warm wie heute oder sogar wärmer gewesen ist.

Die Geologen in Nordamerika hatten einen anderen Ansatz. Sie wiesen darauf hin, daß ein Gletscher, der über das Gelände «wandert», dabei Gesteinsschutt und Schlamm vor sich her schiebt – genau wie heute ein Bulldozer Erde und Schmutz aus dem Wege räumt. Ein Teil der Felstrümmer wird dabei von dem wandernden Gletscher regelrecht zertrümmert. Dieser Schutt bleibt dann unter den Eismassen begraben. Schmilzt aber schließlich das Eis, weil sich das Klima wieder erwärmt, bleibt ein in eine schlammige Masse eingebetteter «Teppich» von Felstrümmern zurück – ein Gemenge, das man als «Grundmoräne» bezeichnet. Während des sich anschließenden *Interglazials* wittert diese Grundmoräne aus und wird teilweise zu Erde, doch gerät sie unter die Trümmer einer neuen Moräne, sobald ein neuer Gletscher auf der Bahn des alten im Vormarsch ist und sich dessen neue Grundmoräne über die Überreste der alten legt. Man kann also die Moränen und die dazwischengelagerten Bodenschichten regelrecht auszählen, um zu bestimmen, wie oft das Eis gekommen und gegangen ist. So wie Penck in Süddeutschland fanden auch nordamerikanische Geologen vier Vergletscherungsphasen. Sie benannten sie nach den US-Staaten, wo sie am deutlichsten ausgewiesen waren:

Nebraskan (dies ist die älteste), Kansan, Illinoisian und Wisconsin. Als ich Student der Geologie war, nahm man allgemein an, daß die vier amerikanischen Glazialphasen den vier europäischen entsprächen.

Doch weder der klassische Ansatz der Europäer noch der der Amerikaner versprach, ein vollständiges Bild der Eiszeit zu vermitteln. Steintrümmer aus der einen Vergletscherungsperiode können von der nächsten einfach abgetragen worden sein. In der Schweiz waren wohl die Gletscher der Riß-Eiszeit am mächtigsten. Jedenfalls trugen sie viel von dem Material ab, das über die früheren Vergletscherungsphasen hätte Auskunft geben können.

Auch das Auszählen der im Lauf der Zeiten teilweise unkenntlich gewordenen Flußterrassen bereitete Schwierigkeiten; insbesondere warf deren Korrelation von Flußtal zu Flußtal Probleme auf und führte zu heftigen Auseinandersetzungen. Ja, Penck selbst hatte anfänglich geglaubt, es habe nur drei Terrassen gegeben, die den verschiedenen Vergletscherungsphasen entsprächen, bevor er zu seiner Einteilung in vier Eiszeiten überging. Später fanden Naturwissenschaftler sogar mehr als vier eiszeitliche Flußterrassen, was darauf hindeutete, daß es vielleicht mehr als nur vier kontinentweite Vereisungsperioden gegeben haben könnte. Doch wie es so geht – Theorien haben die Tendenz, zu unumstößlichen Wahrheiten zu werden, wenn sie erst einmal in Schulbücher Eingang finden. Also haben wir an der Günz-, Mindel-, Riß- und Würm-Eiszeit festzuhalten, selbst wenn wir, um unsere magische Nomenklatur zu retten, «Unterstufen» wie Riß I, Riß II sowie Würm I, II und III einführen mußten.

Der Ozean, dieses gewaltige Sammelbecken von Sedimenten, vermag zusammenhängende, lückenlose Aufschlüsse über die verschiedenen Aspekte der Erdgeschichte zu liefern, doch zu Pencks Lebzeiten konnte man nur Materialproben aus den obersten Schichten des Meeresbodens entnehmen, die man dort sozusagen mit bloßer Hand greifen konnte. Sie gaben wohl Auskunft über die allerjüngste Erdgeschichte, nicht aber über die Eiszeit, deren Überreste in größeren Tiefen begraben sind. Um aber Proben aus tieferen Schichten des Meeresgrundes zu entnehmen, muß man mit einem Kernbohrer in die Erdkruste eindringen und dem Boden der Ozeane Sedimentbohrkerne entnehmen.

Es war die deutsche *Meteor*-Expedition, die 1925–1927 die ersten Tiefseeböhrkerne zutage förderte, die bis in eiszeitliche Schichten hinabreichten. Diese allerersten Bohrkernbezeichnungen sind als «Schwerkraftkerne», denn um sie zu gewinnen, befestigt man einen stählernen Hohlzylinder am Ende eines Stahlkabels, das man ins Meer hinabläßt. Der Schwung, mit dem der Hohlzylinder auf dem Meeresboden auftrifft, treibt das Stahlrohr in die Bodenschichten. Es füllt sich mit dem Material der Sedimente, dem «Kern», den man nur zu entnehmen braucht, sobald der Hohlzylinder wieder an Bord gehievt ist. Derartige «Schwerkraftkerne» sind etwa einen Meter lang. Die Wissenschaftler, die die fossilen *Foraminiferen* in den *Meteor*-Kernen aus dem äquatorialen Atlantik untersuchten, machten eine interessante Entdeckung. Im jeweils obersten Abschnitt dieser Kerne fand sich unter vielen *Foraminiferen* eine ganz bestimmte Art, *Globorotalia menardii*, die noch heute in tropischen Gewässern lebt. Doch in keinem einzigen Mittelteil der Kerne war diese für warme Gewässer so typische Art vorhanden. Allem Anschein nach war der Ozean in jener Phase, die durch die betreffenden Abschnitte der Kerne repräsentiert wird, zu kalt gewesen. Die Forscher folgerten, dieses Material müsse während der letzten Vergletscherungsphase, der Würm-Eiszeit, abgelagert worden sein, als der äquatoriale Atlantik sehr viel kälter war als heute. In tiefer gelegenen Sedimenten in den unteren Abschnitten der

Kerne war *Globorotalia menardii* wieder vertreten. Dieses tiefere Sediment schien folglich aus einer Phase wärmeren Klimas zu stammen, die dem *Interglazial* (der wärmeren «Zwischeneiszeit») vor der letzten großen Vergletscherung entsprach.

Die Ergebnisse der *Meteor*-Expedition wiesen in die Zukunft und weckten Erwartungen; doch durch die damals noch mangelhafte Technik waren der Entnahme von Proben Grenzen gesetzt. Weil ozeanische Sedimente sich mit einer Rate von einigen wenigen Zentimetern pro Jahrtausend ablagern, kann ein nur meterlanger Bohrkern lediglich die Erdgeschichte einiger Hunderttausend Jahre abklären. Die Schwerkraft allein reicht nicht aus, einen stählernen Hohlzylinder tiefer als etwa einen Meter in den Meeresboden zu rammen. Um sich ein vollständiges Bild der eiszeitlichen Klimaschwankungen zu verschaffen, mußte man warten, bis eine Technologie erfunden war, die die Entnahme längerer Bohrkerns ermöglichte.

Der erste Durchbruch in dieser Richtung war der Kullenberg-Kernbohrer – eine Art «Spritze», die nach ihrem Erfinder Borge Kullenberg benannt wurde, einem schwedischen Ozeanographen, der die schwedische Tiefsee-Expedition von 1947–1948 leitete. In der Tat ähnelt das Prinzip dieses Kullenberg-Bohrers dem einer Spritze. Wenn der Zylinder, der die Bohrkerns aufnehmen soll, auf den Meeresboden geworfen wird, fährt aus dem «Kolben» der Spritze ein Fortsatz aus, der an die «Nadel» der Spritze erinnert. Dieser Fortsatz bohrt sich in die Sedimente und saugt – oder besser: preßt – sie in den Kolben hinein. Seit diese Erfindung Ende der vierziger Jahre in Gebrauch kam, waren Geowissenschaftler in der Lage, viel längere Kerne zu bergen und sich auf diese Weise Kenntnisse über weiter zurückliegende Klimaperioden der Vergangenheit zu verschaffen als je zuvor.

Mit Kullenberg-Bohrkerns aus dem Atlantik und der Karibik arbeiteten Dave Ericson und Gösta Wollin vom *Lamont Geological Observatory* in Palisades, New York. Im Jahre 1950 entdeckten diese beiden Wissenschaftler: Das geradezu in die Augen springende Fehlen der wärmeliebenden *Globorotalia menardii* belegt, daß es während der letzten 2 Millionen Jahre insgesamt vier Perioden kälteren Klimas gab, und man konnte nur hoffen, daß sie mit den den Forschern so ans Herz gewachsenen Vereisungsphasen Europas und Nordafrikas übereinstimmten.

Etwa zur selben Zeit fand Gustaf Arrhenius, ein junger schwedischer Geochemiker, der erst kurz zuvor dem Stab des Scripps-Institutes für Ozeanographie beigetreten war, eine neue Methode, um sich mit Datenmaterial aus fossilem Plankton in ozeanischen Sedimenten Aufschlüsse über die Klimaentwicklung der Vergangenheit zu verschaffen. Heute liefert die äquatoriale Zone reiche Planktonernten, weil die Nahrung, die das Plankton benötigt, von Grundströmungen herantransportiert wird, die von der Antarktis zum Äquator fließen, wo ihr Wasser erwärmt emporsteigt und die in ihm enthaltenen Nährstoffe den Plankton-«Weidegründen» an der Meeresoberfläche zuführt. Auf der Grundlage unseres Wissens über das Verhalten

derartiger Grundströmungen folgerte Arrhenius, daß während der Eiszeit, als die Gletscher der Antarktis sich im Vormarsch befanden, die ozeanische Grundströmung stärker gewesen sein muß, so daß der Äquatorialzone mehr Nährstoffe zugeführt wurden, und sich das Plankton viel stärker vermehrte. Die Größe der relativen Planktonpopulation war meßbar: Wenn planktonische Lebewesen starben, sanken ihre Überreste, die Skelette aus kohlensauerm Kalk, sofern vorhanden, zum Meeresgrund und reicherten die dortigen Sedimente mit ihren kalkhaltigen Fossilien an. Je mehr Nannoplankton es gab, desto mehr Kalziumkarbonat wurde abgelagert. Schichten aus den Vergletscherungs- und Warmzeiten unterschieden sich also durch ihren Gehalt an Kalziumkarbonat, der bei Glazialphasen höher war als bei Interglazialen. Arrhenius' Kollegen vom Scripps-Institut wandten dieses Prinzip auch auf den Pazifischen Ozean an, konnten dort allerdings nicht das klassische Muster der vier Kaltzeiten nachweisen. Vielmehr schien es nicht weniger als neun Phasen intensiv kalten Klimas gegeben zu haben.

Die Unstimmigkeit der Schlußfolgerungen, die sich aus den beiden unterschiedlichen Methoden ergaben, machte eine kritische Auseinandersetzung unerlässlich, wozu es der Anwendung eines dritten Verfahrens bedurfte. Emiliani, der damals in Ureys Isotopenlabor an der Universität Chicago arbeitete, wollte die von Urey entwickelte neue Technik anwenden, die Ozeantemperaturen direkt zu bestimmen. Der Bohrkern, den er seiner Analyse zugrundelegte, stammte aus der Karibik, und es war, wie es so geht, einer jener Kerne, die Ericson und Wollin benutzt hatten, um die Population von *Globorotalia menardii* zu zählen.

Die Ergebnisse der beiden Temperaturbestimmungsmethoden stimmten für die oberen Abschnitte der Kerne gut überein. Für die unteren Abschnitte dagegen ergaben sich drastische Widersprüche. *Globorotalia menardii* fehlte im gesamten unteren Segment, was auf eine Kälteperiode hinwies. Andererseits hätte es nach Emilianis Isotopen-Parametern zur gleichen Zeit zwei Warmphasen mit einer dazwischen liegenden Kälteperiode geben müssen. Emiliani geriet in einen noch hitzigeren Disput mit den Naturwissenschaftlern aus Lamont, als er den aus den ozeanischen Kernproben erhobenen Befund mit den Ergebnissen der Penckschen Untersuchungen an Flußterrassen verglich. Nach Emilianis Auffassung waren alle vier Vergletscherungsphasen Pencks auch in dem Sediment-Bohrkern aus der Karibik vertreten, wogegen Ericson und Wollin meinten, das Material reiche nur bis zur Oberkante der Sedimente aus der Mindel-Eiszeit, der zweitältesten Vergletscherungsphase. Beide Gruppen beargwöhnten die Methoden, die jeweils die andere anwandte. Emiliani meinte, daß vielleicht nicht nur klimatische, sondern auch andere Faktoren für das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von *Globorotalia menardii* verantwortlich sein könnten. Ericson und Wollin wiederum mißtrauten der von Emiliani angewandten Isotopentechnik.

So standen die Dinge, als ich 1958 Emiliani bei einem Essen in Miami kennenlernte. Kein Wunder, daß ihm das Erbohren eiszeitlicher Sediment-

kerne wichtiger schien als das Vordringen in die *Mohorovicic-Diskontinuität* mittels einer spektakulären «Mohole»-Bohrung.

Emiliani war gerade aus Chicago gekommen, um an der Universität Miami eine Stellung anzunehmen, wo er seine Arbeit über die Isotope fortsetzen wollte. Zuerst benötigte er einen Massenspektrographen. Also überredete er seinen Schweizer Freund Hans Geiss, ihm zu helfen. Sie scharrten alle Geldmittel zusammen, die sie auftreiben konnten, bis sie schließlich das Geld für ein Massenspektrometer beisammen hatten, und während meines Besuchs in Miami zeigten sie mir voller Stolz ihr Labor. Erregt erzählte mir Emiliani von seinen neuen Funden. Er hatte versucht, die von seinen ersten karibischen Bohrkernen herrührenden Befunde mit den europäischen Kaltzeiten (der Günz-, Mindel-, Riß- und Würm-Eiszeit) in Verbindung zu bringen, doch empfand er dabei solche Unsicherheit, daß er es vorzog, seinen «karibischen Klimavarianten» Zahlen statt Namen beizulegen. Nun – in Miami, wo er mit langen Tiefsee-Sedimentbohrkernen arbeiten konnte – hatte Emiliani sieben zyklische Veränderungen gefunden. Das von den Wissenschaftlern des Scripps-Institutes entdeckte Muster schien die Regel zu sein. Eine Korrelation mit Pencks Chronologie war unsicher. Ganz offenkundig befanden wir uns an der Schwelle eines revolutionären Wandels in unserem Denken über die Eiszeit. Für die endgültige Revolution aber benötigten wir noch mehr Probenmaterial – insbesondere lange Kerne.

Mit dem Optimismus von Einwanderern, die in Amerika noch immer das «Land der unbegrenzten Möglichkeiten» sehen, wandte sich Emiliani Anfang der sechziger Jahre an die «Nationalstiftung Wissenschaft» (*National Science Foundation*) mit der Bitte um Unterstützung, damit er sich lange Tiefsee-Sedimentbohrkerne verschaffen könne, um die Geschichte und die Ursachen urzeitlicher Klimaveränderungen zu untersuchen. Mitglieder der Nationalen Akademie der Wissenschaften der USA (*U. S. National Academy of Sciences*) hatten diskutiert, wie man ein Programm aufstellen könne, um die Sedimente und die obersten Erdkrustenschichten in Ozeanbecken zu erforschen. Sie hofften nun auf die Initiative einiger führender Institute. Emilianis Vorschlag war im rechten Augenblick gekommen, doch Miami verfügte über kein hinreichend geeignetes Arbeitsteam und besaß auch nicht den Gerätebestand, um allein zu handeln. Tatsächlich war mehr als eine kleine Initiative von ein paar Universitäten erforderlich, damit Emiliani seine langgesuchten und heißersehnten Kerne erhalten konnte.

Im Jahre 1963 schlug sich Maurice Ewing, der damalige Direktor des *Lamont Geological Laboratory* der Columbia-Universität, auf die Seite Emilianis und setzte sich aktiv für ein Programm zur Gewinnung von Tiefsee-Sedimentproben aus den Ozeanböden ein. Schließlich schlossen sich angesehene Vertreter aus Miami und Lamont mit den entsprechenden Repräsentanten der *Scripps Institution of Oceanography*, der *Princeton University* sowie der *Woods Hole Institution of Oceanography* zusammen und bildeten das LOCO (long core [«Langkern»])-Komitee, um zu prüfen, wie die Mittel für das Chartern eines

dynamisch auf Position haltbaren Bohrschiffes zu beschaffen wären. Manövrieren, um seine Position zu halten, ist in der Wissenschaft ebenso die Regel wie in allen anderen Lebensbereichen; die Partnerschaft in dem neuen Gemeinschaftsunternehmen wurde ein Spiel mit Schleudersitzen. Miami und Princeton schieden zuerst aus, als LOCO zum «Konsortium für Meereskunde und Meeresforschung» (*Consortium for Ocean Research and Exploration [CORE]*) wurde. Später allerdings schloß sich Miami wieder mit Lamont, Scripps und Woods Hole zusammen. Die betreffenden Institute gründeten die «Vereinigten Ozeanographischen Institute für Tiefboden-Proben» (*Joint Oceanographic Institutions Deep Earth Sampling [JOIDES]*). Später schloß sich die Universität Washington JOIDES an, als die Politik des Kongresses die Nationalstiftung Wissenschaft (*National Science Foundation*) von der Notwendigkeit überzeugt hatte, bei der Repräsentation der verschiedenen US-Regionen auch den pazifischen Nordwesten der Vereinigten Staaten einzuschließen.

Schließlich konnte es sich die JOIDES-Gruppe im Jahre 1965 leisten, das dynamisch auf Position gehaltene Schiff *Caldwell I* zu mieten und während der Monate April und Mai vierzehn Löcher in den Atlantikboden zu bohren. Die beeindruckenden Resultate, die die dabei gewonnenen Bohrkern lieferten, überzeugten mehr und mehr Kollegen, daß ein ozeanweites Programm der Sedimentprobenentnahme zwangsläufig ein wissenschaftlicher Gewinn sein müsse. 1967 wurde mit der *Scripps Institution of Oceanography* ein Vertrag über die Durchführung eines Tiefsee-Bohrprojektes (*Deep Sea Drilling Project [DSDP]*) für wissenschaftliche Zwecke abgeschlossen, wobei einem Mitarbeiterstab von JOIDES beratende Funktion zugedacht war. Die Firma Global Marine Inc. baute eigens für das Projekt ein neues Bohrschiff, das auf den Namen *D/V Glomar Challenger* getauft wurde – dies zur Erinnerung an *HMS Challenger*, jenes berühmte Forschungsschiff, mit dem eine neue Epoche der Meeresforschung begonnen hatte. Das Schiff lief im Mai 1968 vom Stapel – nur vier Jahre nach Emilianis optimistischem Appell an die Nationalstiftung Wissenschaft (*National Science Foundation*).

Am 20. Juli 1968 verließ die *Glomar Challenger* den Hafen von Orange in Texas, und es begann die erste Phase der Meeresboden-Bohrungen im Rahmen des DSDP-Projekts im Golf von Mexico. Den ehrenvollen Auftrag, die erste Kreuzfahrt des neuen Schiffes zu leiten, erteilte man Maurice Ewing, dem Hauptbefürworter und Hauptrepräsentanten der JOIDES-Gruppe. Später, aber noch im selben Jahr, als dessen «Leg 3» genannter Teil begann, stieß auch ich zu dem JOIDES/DSDP-Unternehmen. Dieser Teil des Unternehmens sollte die Theorie der Meeresboden-Ausdehnung (*Seafloor Spreading*) im Südatlantik überprüfen. Im Vergleich zu den Ergebnissen, die die Wissenschaft revolutionieren sollten, waren Emilianis Wünsche bescheiden. Sie fanden bald durch 100 Meter lange Bohrkern ihre Erfüllung – Bohrkern voller eiszeitlicher Ablagerungen.

Doch die auf dieser Fahrt geborgenen Kerne eröffneten auch eine neue Runde in der hitzigen Auseinandersetzung um das Klima am Ende der Kreidezeit.

Mehr als 1000 m tiefe Löcher wurden nun in den Meeresboden getrieben, um Material zu sammeln, das sich im Laufe der 150 Millionen Jahre seit dem Ende des Mesozoikums abgelagert hatte, und wir legten die Proben, die wir geborgen hatten, den Isotopenanalytikern auf den Tisch. Das DSDP-Bohrloch Nr. 21, das im Südatlantik in eine Erhöhung des Meeresbodens gesenkt wurde, welche die Bezeichnung «Rio-Grande-Anhebung» trägt, durchdrang die Grenzlinie zwischen Kreidezeit und Tertiär. Tsuni Saito, der als Paläontologe an Bord der *Glomar Challenger* tätig war, trennte die planktonischen *Foraminiferen* von den Arten, die den Meeresboden bewohnt hatten. Seine Kollegen vom Lamont Institut analysierten die beiden Fossiliengruppen und gewannen so Zahlen für die Meerestemperatur am Boden und an der Oberfläche. Die Ergebnisse ihrer Analysen lagen 1974 vor. Sie bewiesen: Am Bohrloch DSDP 21 war während der letzten Jahrmillionen des Mesozoikums sowohl die Oberflächen- als auch die Bodentemperatur um etwa 5 Grad Celsius gesunken. In der Anfangsphase des Känozoikums war der Ozean sogar noch kälter. So stimmte das Team von Lamont mit Urey und seinen Chicagoer Kollegen darin überein, daß das Klima gegen Ende des Mesozoikums kälter geworden war. Mehr noch: Die Abkühlungstendenz setzte sich über die Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär bis ins Känozoikum fort. Die dritte Runde der Schlacht um das Endklima der Kreidezeit ging damit an die Vertreter der Kältetod-Theorie.

Die Arbeit, die die Lamont-Wissenschaftler leisteten, erwies sich aber lediglich als Eröffnungssalve. Ihre Folgerungen wurden sofort in Frage gestellt, denn ihre Feststellungen, die den Abkühlungstrend betrafen, stützten sich auf ganze drei Proben, die einen Zeitraum von 3 oder gar 5 Millionen Jahren repräsentieren. Kurzzeitige Klimaschwankungen dagegen, wie sie während der Eiszeit auftraten, dauerten 0,1 Millionen Jahre oder weniger. Die Entnahme anderer Proben könnte zu vollkommen anderen Ergebnissen führen.

Während der ersten fünf Jahre ihres Einsatzes bohrte die *Glomar Challenger* mehr als zweihundert Löcher und barg Bohrkerne, deren Länge, zusammengerechnet, viele tausend Meter betrug. Nur sehr wenige dieser Proben wurden daraufhin untersucht, ob sie Aufschlüsse über die urzeitliche Klimageschichte geben könnten. Dies lag keineswegs an mangelndem Interesse, sondern daran, daß sich nur wenige Proben für eine solche Untersuchung eigneten. So hatten wir zwar die Grenze zwischen der Kreidezeit und dem Tertiär auch am Bohrloch 20 überschritten, doch in den dortigen Sedimenten waren die benthischen (den Meeresboden bewohnenden) *Foraminiferen* zu rar, als daß man sich von der Isotopenanalyse brauchbare Resultate hätte versprechen können.

Das gleiche Problem bereitete mir Kopfzerbrechen, als ich an Bord der *Glomar Challenger* zur zweiten Tiefsee-Bohrexpedition antrat, an der ich teilnahm. Damals – es war im Jahre 1972 – fanden wir paläontologische Beweise dafür, daß das Wasser am Grunde des Mittelmeeres vor 5 Millionen Jahren

kälter war als heute, doch hätte ich gern ein paar genaue Zahlen gesehen. Ich sprach in Lamont mit meinem alten Schiffsgenossen Saito über die Isotopentechnik, und der erklärte mir, wie groß die Schwierigkeiten waren. Ozeanische Schlämme enthielten so wenig Exemplare benthischer *Foraminiferen*, daß für eine routinemäßige Analyse einfach zu wenig Material da war. Allerdings hatte Saito gehört, daß ein junger Physiker der Universität Cambridge an einem Apparat arbeitete, der Isotopenzusammensetzungen auch noch anhand kleinster Mengen von Testmaterial messen konnte. Vielleicht fanden wir hier die Hilfe, die wir brauchten. Nachdem er zwei Meter des Bohrkerns gründlich nach *Foraminiferen* «durchforstet» hatte, gelang es Saito, drei winzige Exemplare herauszufischen, die einst den Mittelmeerboden bewohnt hatten. Er verschloß sie in einer Phiole und ich brachte sie eigenhändig zu Nick Shackleton nach Cambridge.

Shackleton ist der Sohn eines weltbekannten Geologen. Er studierte Physik, um nicht sein Leben lang im Schatten seines berühmten Vaters zu stehen. Die Physik brachte ihn an das botanische Institut der Universität Cambridge, denn es gab hier eine Unterabteilung, die sich mit Paläobotanik befaßte und paläobotanische Befunde auch im Hinblick auf die Klimaentwicklung der Urzeit auswertete. Dafür brauchte man aber Physiker, die fähig waren, eine Isotopenanalyse durchzuführen. So war Shackleton zwar glücklich der Geologie entronnen – dies aber nur, um auf Umwegen doch wieder bei der Geologie zu landen. Mit seiner speziellen Begabung für das Arbeiten mit immer raffinierteren Instrumenten wurde er bald zum führenden Experten für die Geologie des Pleistozäns (des Eiszeitalters) und des Holozäns (der geologischen Jetztzeit).

Wie wichtig die von Shackleton entwickelte Methode war, die Isotopenkomposition von Proben zu bestimmen, die nur ein paar Dutzend Mikrogramm wogen, läßt sich gar nicht abschätzen. 1979 wollte ich Shackleton nach Zürich bringen, um uns von ihm bei der Verbesserung unseres Isotopenlabors helfen zu lassen (und schließlich kam er auch tatsächlich), doch als ich bei einer Versammlung des akademischen Senats seine Fähigkeiten unterstrich, zweifelten meine Kollegen am Wert seiner Erfindung. Professoren, die sich auf Materialprüfung spezialisiert hatten, sprachen sich eher dafür aus, daß die Proben gar nicht groß genug sein könnten, und sie sahen die Notwendigkeit nicht ein, Specimina von Mikrogrößen zu untersuchen. Ich mußte ihnen erst einmal erklären, wie schön und wichtig auch kleine Proben sein können – nämlich dann, wenn man Präzision wünscht.

Die Isotopenanalyse von *Foraminiferen* aus zwei Meter langen Bohrkern-Abschnitten kann uns Aufschluß über die durchschnittliche Ozeantemperatur einer Viertel- oder einer halben Jahrmillion geben. *Foraminiferen* aus einer Probe, die lediglich einen Zentimeter mißt, können uns nun über die Durchschnittstemperatur einiger Jahrhunderte informieren. Shackletons Technik gab uns so die Möglichkeit, kurzfristige Veränderungen wahrzunehmen.

Shackletons Apparat arbeitete seit Anfang der siebziger Jahre, und

meine Probe aus den Mittelmeerbecken war eine der ersten, die von ihm analysiert wurden. Die Arbeit, die Shackleton in den folgenden Jahren leistete, zeigte uns schon sehr bald, daß den Temperaturschwankungen der Eiszeit andere, erhebliche Temperaturstürze vorausgegangen waren. Die Untersuchung eiszeitlicher Klimaentwicklungen war das Hauptziel der zweiten Phase des Tiefsee-Bohrprojektes (*Deep Sea Drilling Project* [DSDP]), zu dessen Durchführung die *Glomar Challenger* 1973 in die Antarktis auslief. Nach einem erfolgreichen Abstecher in das Ross-Meer fuhr das Bohrschiff in die Gewässer südlich von Neuseeland, wo drei Bohrlöcher gesetzt wurden. Eines davon drang 472 Meter tief in Sedimente aus dem Paläozän ein – Sedimente aus der frühesten Epoche des Känozoikums. Jim Kennett, ein Neuseeländer, der damals an der Universität von Florida lehrte und einer der wissenschaftlichen Leiter der *Glomar-Challenger*-Expedition war, war gleichzeitig auch ein Spezialist für *Foraminiferen*. Er nahm Proben in Abständen von 80 Zentimetern, die jeweils eine Million Jahre repräsentierten, und trennte die planktonischen von den benthischen *Foraminiferen*. Shackleton führte die Isotopenanalyse durch. Die Zusammenarbeit der beiden Wissenschaftler verhalf uns zum ersten Male zu numerischen Angaben über die Temperaturschwankungen, die im Laufe einiger Jahrtausende des Känozoikums in den Ozeanen der Südhalbkugel stattgefunden hatten. Der Befund zeigte: Das Absinken der Temperatur vollzog sich nicht linear. Statt dessen entdeckten die beiden Forscher während des Känozoikums sieben bedeutendere Temperatur-«Stufen». Die letzte dieser «Stufen» gab es vor zwei Millionen Jahren – sie war es, die zum Vordringen der kontinentalen Gletscher während der Eiszeit führte.

Diese epochemachende wissenschaftliche Leistung Shackletons und Kennetts wurde in einem Aufsatz publiziert, der zu einem der meistzitierten geologischen Fachartikel werden sollte. Wir Wissenschaftler in der Schweiz jedenfalls übersahen diese bedeutende Arbeit nicht, und Shackleton wurde 1978 sogar nach Zürich geladen, um seine Daten aus den Ozeanen der südlichen Erdhemisphäre vorzulegen.

Shackleton überraschte uns mit ganz neuem Material. Ein Bohrloch, DSDP 384, das in den Meeresboden des Westatlantiks eingebracht worden war, durchdrang nicht nur frühtertiäre Schichten, sondern auch Sedimentablagerungen der jüngeren (oberen) Kreidezeit. Somit konnte Shackleton seine Temperaturbestimmungen über die Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär hinaus ausdehnen. Sein Verfahren hatte inzwischen derartige Fortschritte gemacht, daß er nunmehr auch Proben analysieren konnte, die nur ein paar vereinzelte *Foraminiferen* enthielten, falls diese alle derselben Art angehörten. Gemischte «Vergesellschaftungen» (Assemblagen) gaben gemischte Signale, doch die Signale, die von einer einzigen Art ausgingen, waren klar und deutlich. Shackleton warf eine Skizze an die Tafel und erläuterte die jüngsten Resultate von DSDP 384. Seine Daten zeigten für die Phasen nach dem Ende der Kreidezeit einen plötzlichen Temperaturanstieg am Meeresboden. Es hatte also eine Zunahme – keine Abnahme! – der Meeresbodentemperatur um 5 Grad Celsius gegeben. Die «Erwärmungs-

schule» – mit anderen Worten, die Gruppe jener Gelehrten, die an einen Wärmetod der Saurier glaubten – gewann die Endrunde.

Shackleton sprach gewöhnlich ganz eintönig. Er lieferte hervorragendes Zahlenmaterial, doch hatte er keineswegs die Absicht, in die große Debatte über das Ende der Dinosaurier einzugreifen. Nach seinem Vortrag äußerte man Zweifel, denn seine Ergebnisse schienen der Schlußfolgerung der Wissenschaftler aus Lamont zu widersprechen. Doch gab es im Grunde keine echten Widersprüche. «Ältere Gelehrte, die an der Lösung dieses Problems arbeiteten», so erklärte er, «verfügten nicht über Proben, die jenes eine Jahrillion umspannende Intervall repräsentierten, das unmittelbar die Grenze übergriff. Ihnen fehlte das Signal!» War er seiner Messungen sicher? Gewiß war er das. Was war die Ursache des plötzlichen Temperaturanstiegs? Das wußte er allerdings nicht. Doch eine so plötzliche Erwärmung der Ozeane um 5 Grad schien unvorstellbar, wenn man von den sonst für Klimaschwankungen verantwortlichen Ursachen ausging.

Bisweilen geht menschliches Denken recht sonderbare Wege. Mehr als zwei Jahre waren nach jener Brotzeit vergangen, bei der ich die Seiten des ominösen Artikels von de Laubenfels überflogen hatte. Ich konnte mich schon gar nicht mehr erinnern, in welchem Journal und in welchem Jahr besagter Artikel veröffentlicht worden war; ja nicht einmal an den Namen des Verfassers erinnerte ich mich noch.

Doch die «Heißluft»-Geschichte war im Computer meines Gehirns gespeichert, und es kam sofort zu einem «Aha-Erlebnis», als Shackleton seine Skizze an die Wandtafel warf.

Mit der Hilfe unserer Bibliothekarin spürte ich den Artikel auf und versuchte auch herauszufinden, wer sein Verfasser war. Der Aufsatz trug den schlichten Titel: *Dinosauria Extinction: One More Hypothesis (Das Sterben der Dinosaurier: eine Hypothese mehr)* und war 1956 in der Fachzeitschrift *Journal of Paleontology* erschienen. De Laubenfels war Paläontologieprofessor an der Staatsuniversität von Oregon in Corvallis, Oregon, gewesen. Er hatte sich auf fossile Schwämme spezialisiert, doch nicht viel veröffentlicht. Seine Arbeit über den Sauriertod war sein Schwanengesang: Er starb zwei Jahre nach ihrer Veröffentlichung.

De Laubenfels verfocht die These, daß Hitze – keine sehr langanhaltende Hitzeperiode, sondern eher eine sehr kurze Phase extrem hoher Temperatur – den Untergang der Dinosaurier bewirkt habe. Er glaubte an Temperaturen, die in den Tropen dem Siedepunkt nahekamen und bis zu 50 Grad Celsius in höheren Breiten erreichten. «Verheerende Böen überhitzter Luft wirbelten überall umher, und nur vereinzelte kleine Partien der Kontinente blieben verschont.» Unter diesen Umständen gingen alle Dinosaurier zugrunde. Riesenechsen mußten unter derartigen Umständen verenden, denn sie konnten sich nicht verstecken und vor der Hitze in Sicherheit bringen. Schildkröten dagegen «besitzen die Fähigkeit, stundenlang unter Wasser den Atem anzuhalten». Also überlebten sie. Auch Krokodile überlebten. De Lau-

benfels sah dies so: «Ein Gelege ihrer Eier, das gut im Schlamm vergraben war (...) überstand die Katastrophe.» Eidechsen überlebten, weil sie sich in Felsspalten oder in ihren Nisthöhlen vor der Hitze verbargen. Auch Schlangen lebten weiter, weil auch sie sich verstecken konnten. Vögel und Säugetiere aber überstanden das Desaster am besten, weil sie «in (...) schneebedeckten hohen Breiten lebten (...). Selbst siedendheiße Luft kühlt sich, wenn sie meilenweit über Schneefelder streicht, so weit ab, daß man sie noch atmen kann.» Eine kurze Hitzewelle hätte auch genügend Vegetation übriggelassen, um die Erde anschließend wieder ergrünen zu lassen. Mochten viele Pflanzen bis hin zum Boden verbrannt sein – ihre Wurzeln konnten doch wieder treiben!

De Laubenfels äußerte sich nicht darüber, was mit den *Ammoniten* oder dem Meeresplankton geschah. Vielleicht dachte er, daß keine in den Oberflächengewässern des Meeres schwimmenden Organismen überleben konnten, wenn die Lufttemperatur bis fast auf den Siedegrad von Wasser erhitzt war, und hielt es deshalb nicht für nötig, auch nur ein Wort darüber zu verlieren.

Als Ursache dieses kurzen, aber heißen Weltunterganges betrachtete de Laubenfels den Einschlag eines riesigen Meteoriten auf die Erde. Nach seinen Berechnungen genügte dafür ein eisernes Himmelsgeschoß von 100 Metern Durchmesser und einem Gewicht von 30 Millionen Tonnen. Sein Aufprall auf die Erde hätte Energien freigesetzt, die der Explosivkraft von 3000 Megatonnen Trinitrotoluol (TNT) oder von 200 000 Atombomben jenes Typs entsprachen, der am 6. August 1945 über Hiroshima abgeworfen wurde.

Als ich 1956 de Laubenfels' Geschichte erstmals las, konnte sie noch nicht beanspruchen, als wissenschaftliche Theorie anerkannt zu werden, so plausibel sie sich auch ausnehmen mochte, denn es gab keinerlei Hinweis darauf, wie de Laubenfels' Behauptungen zu beweisen wären. Wie viele andere Ideen, die ihrer Zeit voraus waren, mußte auch seine Meteoriten-Hypothese warten, bis ein Weg gefunden war, ihre Richtigkeit zu beweisen. Nun, nachdem Shackleton seine Zahlen vorgelegt hatte, schien es möglich, daß de Laubenfels, dieser obskure, sonst kaum beachtete Paläontologe, ein Prophet gewesen war. Sind die Ozeane tatsächlich durch den Aufprall eines riesigen Meteoriten, der die Luft erhitzt hat, aufgeheizt worden?

Der Tod vom Himmel

Einmal die Woche gehe ich in unsere Bibliothek, um die neuesten Zeitschriften zu überfliegen. Dies ist für mich zur Gewohnheit geworden, so wie man zum Frühstück seine Zeitung liest. Diese Gewohnheit dient nicht zuletzt der Entspannung. *Nature* und *Science* sind meine Lieblingsblätter. Sie erscheinen wöchentlich und bringen immer etwas Neues – sei es ein Bericht über eine neue Antibabypille, eine neue Theorie über Stonehenge oder über die Entdeckung von Eidechsen mit Parthenogenese («Jungfernzeugung», Vermehrung ohne Mitwirkung eines männlichen Tieres). Anfang der siebziger Jahre – damals war der publizistische Wirbel um den Kometen Kohutek kaum abgeebbt – stieß ich eines Tages auf einen schon sehr viel früher erschienenen Artikel, den Fred Whipple im Jahre 1950 geschrieben hatte. Es ging um Kometen – jene seltsamen Besucher aus dem Weltraum.

Die Chinesen unterscheiden vier Arten von Sternen: Die Sonne ist für sie ein beständiger Stern, der in unserem Sonnensystem seine feste Position hat. Meteore sind sterbende Sterne, die zur Erde fallen. Kometen aber gelten als weise Sterne. Warum weise? Ich weiß es nicht.

Whipple erläuterte das Wort «Komet». Es geht auf die griechische Bezeichnung *astér kométes* (wörtlich: «langhaariger Stern», «Haarstern») zurück. *Astér* heißt in dieser Wortkombination «Stern», *kométes* («langhaarig») bezieht sich auf den «Schweif», das «Haar» des Kometen-«Kopfes». In diesem «Kopf» befindet sich der Kern (Nukleus), der die dichteste Masse des Kometen enthält. Er ist umgeben von einer Atmosphäre aus Eiskristallen, Staub und ionisierten Partikelchen: Atomen, die Elektronen verloren haben. Diese «Atmosphäre» bildet in Wirklichkeit den Anfang des Kometenschweifes, der manchmal Millionen von Kilometern, multipliziert mit dem Faktor zehn, nach hinten reicht. Durch den Schleier von eisigem Staub, der ihn umgibt, wird der Kern des Kometen für uns unsichtbar. Doch Berechnungen zufolge beträgt sein Durchmesser selten mehr als 10 Kilometer.

Kometen lassen im interplanetarischen Raum Trümmer hinter sich zurück, die die Größe einer Weinbeere erreichen können. Viele Jahre lang galt daher allgemein als ausgemacht, so ein Kometenkern sei eine Art himmlischer «Kiesbank», die durch den Raum rast. Ihre Einzelbestandteile, die man oft mit jener Art von Kies verglich, wie man ihn für Garten- und Parkwege verwendet, wären, so dachte man, nicht durch ein Bindemittel miteinander verkittet, sondern würden nur durch ihre gegenseitige, schwerkraftbedingte Anziehung beieinandergehalten.

Eine lose Anhäufung von Kieselsteinchen im Weltraum aber bricht – nicht anders als ein flüssiger Körper – dann auf, wenn sie einem größeren Stein mit größerer Schwerkraft zu nahe kommt. Nach den Berechnungen des französischen Astronomen E. Roche wird ein solcher Körper von der Anziehungskraft eines Sterns auseinandergerissen, wenn er sich dem Stern auf eine Entfernung nähert, die kleiner ist als der zweieinhalbfache Sterndurchmesser. Man bezeichnet diese kritische Distanz als die «Roche-Grenze».

Frank Whipple vertrat demgegenüber 1950 die neue Idee, ein Komet sei eher ein schmutziger Schneeball als eine durchs All rasende Kiesbank. Seiner Ansicht nach handelt es sich bei dem Schotter im Kern des Kometen nicht um lose Steinchen im Formationsflug, sondern um massive Brocken, die in Eis eingeschlossen sind und vom Eise zusammengehalten werden. Die Eigenwilligkeit der Kometenbewegungen hatte es Whipple ganz außerordentlich angefallen. Newtons Schwerkraftgesetz zufolge mußten sich diese mit der Präzision eines Uhrwerks vollziehen. Doch wenn uns der Komet Encke alle drei Jahre seinen Besuch abstattet, kommt er stets zweieinhalb Stunden zu früh. Im Gegensatz dazu scheint der Halleysche Komet eher ein Zauderer zu sein. Denn bei seinen letzten elf Erscheinungen verspätete er sich im Durchschnitt um 4,1 Tage. Ein so sonderbares Verhalten läßt sich – wie Whipple vermutete – nur damit erklären, daß Kometen einen Teil ihrer Masse verlieren, wenn sie sich der Sonne nähern. Er nahm an, daß die Strahlung das Eis in dem «schmutzigen Schneeball» verflüchtigte – es zum Verdampfen brachte, ohne es vorher zu schmelzen – und daß die Rückstoßwirkung der verdampfenden Moleküle, die von dem Kometen wegströmten, diesen entweder näher an die Sonne heran- oder von ihr wegstrieb. So würdesein Wiedererscheinen am nächtlichen Erdenhimmel entweder beschleunigt oder verzögert.

Whipples Idee, daß Kometenköpfe durch Eis zusammengehalten werden, wurde auf die Probe gestellt, als der Komet Ikeya-Seki in einer Entfernung an der Sonne vorbeiflog, die nur ein Drittel des Sonnendurchmessers betrug. Damit befand er sich ein gutes Stück innerhalb der Roche-Grenze. Wäre der Komet lediglich eine «Kiesbank» gewesen, hätte er unter der Einwirkung der Sonnenschwerkraft auseinanderbrechen müssen. Wären aber seine Bestandteile durch festes Eis zusammengehalten worden, hätte sein Kern stark genug sein müssen, um zusammenzuhalten. Und tatsächlich vermochten die gewaltigen Kräfte der Sonne, die auf den Kometen einwirkten, dem «Haarstern» fast nichts anzuhaben. Der Komet kam praktisch ungeschoren davon. Whipple hatte recht.

Woraus bestehen Schnee und Eis? Aus gefrorenem Wasser natürlich. Whipples Aufsatz erklärte jedoch, daß in der extremen Kälte des Weltraumes auch andere Substanzen als Wasser gefrieren. Beispielsweise handelt es sich bei dem Eis auf dem Mars um «Trockeneis» aus gefrorenem Kohlendioxyd. Außerdem gibt es da Ammoniak, Methan und Kohlenmonoxyd, die mit Staub aus verschiedenen Gesteinsarten und Metallen vermischt und aneinandergefroren sind.

So weit war der Artikel recht interessant gewesen, doch als ich las, daß Kometen auch gefrorene Zyanide (hochgiftige Salze der nicht minder giftigen Blausäure) enthalten, richtete ich mich kerzengerade in meinem Sessel auf. Zwar hatte es seit eh und je Anhaltspunkte dafür gegeben, doch die jüngsten Untersuchungen des Kometen Kohutek ließen wenig Zweifel daran, daß diese tödlichen Chemikalien nicht nur tatsächlich in Kometen enthalten sind, sondern auch in Mengen, die 10–20 % der Kometenmasse ausmachen.

Als ich von den Zyaniden las, war ich beunruhigt. Der Halleysche Komet hat eine Masse von einer Trillion Tonnen. Wenn Zyanide 10 % seiner Masse ausmachen – welch eine Katastrophe muß es da geben, wenn diese 100 Milliarden Tonnen Gift bei einem Zusammenstoß mit der Erde in die Ozeane gerieten! Doch der Gedanke verflog so rasch, wie er gekommen war. Selbst für den Zeitraum von einer Milliarde Jahren gab es nicht die mindeste Wahrscheinlichkeit, daß ein Komet von der Größe des Halleyschen mit der Erde zusammenstieß. Ich las weiter und vergaß die schreckenerregenden Aussichten.

Doch das war vor fünfzehn Jahren, und ich hatte damals kaum eine Ahnung von der Bedeutung der geologischen Zeit im Hinblick auf die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Katastrophen. Damals begriff ich noch nicht den Zusammenhang zwischen Zeit und Möglichkeit, ja Wahrscheinlichkeit; ich dachte auch nicht an das geflügelte Wort, daß alles, was eintreten kann, auch eintreten wird – vorausgesetzt, es ist Zeit dafür da. Mein Gefühl trog mich nicht. Innerhalb von einer Milliarde Jahren sind die Chancen eines kosmischen Zusammenstoßes größeren Ausmaßes, an dem unsere Erde beteiligt ist, sehr, sehr klein. Doch die Erdgeschichte dauert schon länger als 4 Milliarden Jahre. Kleinere Zusammenstöße mit Meteoriten kamen immer wieder vor, wie viele Krater aus alter Zeit bezeugen. Sogar in der kurzen Phase der Menschheitsgeschichte gab es das sehr reale Ereignis von Tunguska.

Die Tunguska ist ein Nebenfluß des Jenissej in Zentralsibirien. Am 30. Juni 1908 um sieben Uhr morgens sichtete man an einem ihrer Zuflüsse einen Feuerball über dem südöstlichen Horizont. Das blendende, blaue Licht raste über den wolkenlosen Himmel und explodierte irgendwo im Nordwesten. Die Explosion war die stärkste, die je in den Annalen der Menschheitsgeschichte verzeichnet wurde. Als Seismographen aufgrund ihrer Messungen die Energie dieses Superknalls berechneten, erstarrten sie. In heutige Begriffe übersetzt, muß es sich um eine Detonation im Stärkenbereich von 10 Megatonnen gehandelt haben. Mit anderen Worten: Sie war 700mal so stark wie die Explosion der Atombombe von Hiroshima.

Die strahlende Himmelserscheinung sah man noch Hunderte von Kilometern weit. Noch in 1000 Kilometer Entfernung vernahm man den Donner der Explosion. Beobachter, die dem Ereignis aus sicherer Entfernung zusahen, berichteten auch von einer Feuer- und Rauchsäule, die in einen typischen Wolkenpilz überging, der sich bis zu einer Höhe von 20 Kilometern erhob. Ein Bauer, der 60 Kilometer von der Einschlagstelle entfernt wohnte, wurde durch eine Böe des heißen Feuersturms von seiner Haustreppe geris-

sen und einige Meter von seinem Hause entfernt auf den Boden geschleudert. Die ungeheure Hitze verursachte bei ihm schwere Brandwunden. Die Druckwellen rasten zweimal um den Erdball; während der folgenden beiden Nächten sah man in Europa hoch am Himmel die Wolken des bei dem Aufprall aufgeworfenen Staubes glühen. Sie glühten natürlich nicht mehr wirklich, leuchteten aber noch lange in der Nacht, da sie noch immer von der Sonne angestrahlt wurden, die für die Erdenbewohner längst untergegangen war. Ein paar Wochen später gingen riesige Mengen verbrannter Trümmer auf Kalifornien nieder, so daß die sonst so klare Atmosphäre sichtlich getrübt war.

Glücklicherweise war das unbekannte Objekt in einer Höhe von 8,5 Kilometern über der Erdoberfläche explodiert, und die Absturzstelle war recht spärlich besiedelt. Einheimische Jäger, die als erste den Schauplatz der Katastrophe betraten, berichteten, daß der gesamte Wald regelrecht umgelegt worden war, und erzählten von starken Waldbränden.

Zum Gegenstand systematischer wissenschaftlicher Forschung aber wurde das Ereignis erst zwei Jahrzehnte später. Erst 1927 besuchten sowjetische Wissenschaftler unter Leitung von Leonid Kulik die Einschlagstelle. Kuliks Kollektiv, das mit Pferdewagen anrückte, um die Nachwirkungen des Aufpralls zu untersuchen, kämpfte sich unter ungeheuren Schwierigkeiten durch den zerstörten Wald. Deutlich zeigen die Kartenskizzen der Wissenschaftler, daß innerhalb eines Radius von 30–40 Kilometern die Bäume entwurzelt und radial vom Zentrum der Explosion «weggeblasen» worden waren. Die Zone der größten Hitze unmittelbar unter dem Zentrum der Explosion des Feuerballs maß 2000 Quadratkilometer. Dieses gesamte Gebiet war durch Feuer verwüstet, ja Brand- und Hitzespuren erblickte man innerhalb eines Bereiches von 18 Kilometern Durchmesser überall.

Die Aufschlagstelle selbst war ein großer Sumpf, markiert durch zahlreiche Gruben und flache Eintiefungen. Kulik glaubte, er habe es hier mit Kratern vom Einschlag kleinerer Meteoritenfragmente zu tun. Also wurde ein Graben ausgehoben, um eine der größeren Gruben zu entwässern, doch von einem Meteoriten fand sich darin keine Spur. Drei spätere Expeditionen, die zur Aufschlagstelle kamen, bevor die Forschungen durch den Ausbruch des Zweiten Weltkrieges unterbrochen wurden, gelangten zu dem Ergebnis, die Gruben seien wahrscheinlich schon vorhanden gewesen, bevor der Feuerball einschlug. Von dem in die Erdatmosphäre eingetretenen Objekt seinen keine nennenswerten Bruchstücke erhalten geblieben und in den Boden geschlagen.

Nach dem Kriege nahm man die wissenschaftlichen Forschungsarbeiten an der Einschlagstelle unweit der Tunguska wieder auf – sie werden bis in die Gegenwart fortgesetzt. Zwar fand man noch immer keine Meteoriten, doch Bodenproben aus diesem Gebiet enthalten kleine, annähernd kugelförmige (sphärische) Objekte, die an Tektite erinnern – an schwarze, glasige Objekte, die man im Boden oder in zu Felsgestein gewordenen Sedimenten

findet und allgemein für das Ergebnis von Meteoriteneinschlägen hält. Die chemische Zusammensetzung derartiger Aufprall-Tektite entspricht ganz und gar der normalen Felsgesteins. Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich um Fragmente, die aus Einschlagkratern fortgeschleudert wurden und in der enormen Hitze des Aufpralls schmolzen. Während ihres Fluges erstarrten sie wieder, behielten aber die Tropfenform des geschmolzenen Zustandes bei, und fielen schließlich zur Erde. Nur ganz geringe Beimengungen außerirdischer Substanzen, die von den Meteoriten selbst herrühren, finden sich in ihrer Zusammensetzung. Auch die Kügelchen aus dem Tunguska-Gebiet verglich man mit kleinen Tektiten (Mikrotektiten), die gewöhnlich nur Bruchteile von Millimetern messen, doch ließ die chemische Zusammensetzung dieser erstarrten Gesteinsschmelzetropfen eher an kosmischen Staub denken. Anscheinend handelte es sich in diesem Fall also nicht um Auswurf aus dem Aufprallkrater. Vielmehr stammten die Kügelchen direkt von dem Objekt, das mehrere Kilometer über der Gegend explodiert war; sie waren als kosmischer Fallout auf die Erde herabgeprasselt.

Was aber war an jenem sonnigen Morgen über der Tunguska explodiert?

Von schwarzen Löchern bis hin zu Klumpen von Antimaterie haben die Astronomen so ziemlich alles beschworen, was als Ursache in Frage kommt. Doch so dramatisch dieses Ereignis war, es bedarf wohl keiner exotischen Erklärung. Viel wahrscheinlicher läßt es sich ganz konventionell erklären: Das Objekt, das über dem Tunguska-Gebiet verglühte, war ein großer Meteor!

Meteore tragen von Land zu Land verschiedene volkstümliche Namen. Im deutschsprachigen Raum bezeichnet man sie als «Sternschnuppen». Es handelt sich bei ihnen um große Stücke außerirdischer Materie, die in die Erdatmosphäre eindringen und durch die dabei auftretende Reibungshitze aufgeheizt werden. Ihren Namen verdanken diese Eindringlinge den Griechen, die die Lichterscheinungen, welche diese Weltraumtrümmer hervorrufen, irrtümlicherweise für ein meteorologisches Phänomen hielten. Heute wissen wir, daß es sich entweder um Bruchstücke von Asteroiden handelt, die ihrerseits Trümmer sind, welche von lange zurückliegenden Planetenzusammenstößen herrühren, oder aber um Kometenfragmente aus den entlegenen Weiten des Sonnensystems. Diejenigen von ihnen, die das Eindringen in die Erdatmosphäre durchstehen, ohne ganz und gar zu verdampfen, nennt man Meteoriten. Meteoriten bestehen meist aus Gestein, viele sind aber auch zu einem großen Teil aus Eisen. Je größer der Meteor und je dichter das Material, aus dem er besteht, desto mehr wird von ihm in Form eines oder mehrerer Meteoriten überdauern.

Von einem aus Eisen bestehenden Meteoriten, der 1947 über der Ostküste Sibiriens in die Erdatmosphäre eintrat und dabei in einer Höhe von 6 Kilometern auseinanderbrach, fand man rund 380 Fragmente, die zusammen über 23 Tonnen wogen. Dies war ein vergleichsweise sehr viel bedeutungsloseres Ereignis als das oben beschriebene. Die Explosion hatte eine Energie von etwa zwei Kilotonnen (oder weniger als 0,1 % der großen Explosion aus

den Tunguska-Gebiet). Am 31. März 1965 raste wieder ein Feuerball durch den Himmel über Britisch-Kolumbien. Die Anzeigen der Meßinstrumente ließen beim Eintritt in die Erdatmosphäre eine Energie von 20 Kilotonnen vermuten, und man fand zahlreiche steinerne Meteoritenfragmente. Wenn es ein Meteor war, der über der Tunguska explodierte – wo waren dann seine Bruchstücke? Das Ausmaß der Explosion im Tunguska-Gebiet spricht gegen einen Eisen- oder Steinmeteoriten, der so klein war, daß er sich buchstäblich in nichts auflöste – abgesehen von ein paar winzigen Mikrotektiten. Und doch hinterließ die ziemlich heftige, ja gewältige Explosion zwar diese kleinen Kügelchen von kosmischer Zusammensetzung, doch keine makroskopisch faßbaren Meteoritenfragmente oder -krater. Dies spricht für eine Erklärung, die Whipple und einige sowjetische Gelehrte schon in den dreißiger Jahren zur Diskussion stellten: Das Objekt bestand aus sehr instabilem Material. Es handelte sich um einen Kometen oder ein Kometenfragment auf Kollisionskurs mit der Erde.

Vermutlich bewegte sich der Komet von 1908 entgegengesetzt zur Erdbewegung. Demnach wäre bei einer Geschwindigkeit von 60 Kilometern pro Sekunde ein Frontalzusammenstoß erfolgt. Der Kern des Kometen (oder wenigstens ein Teil von ihm) explodierte und löste sich auf. Die Explosionsenergie, die zum größten Teil von der freigewordenen kinetischen Energie (Bewegungsenergie) herrührte, wurde auf den Gegenwert von 10 Millionen Tonnen Trinitrotoluol (TNT) geschätzt. Hierauf wiederum beruht die Schätzung der Masse des Kometen: Sie muß 30 Millionen Kilogramm betragen haben.

Dies wäre ein sehr kleiner Komet gewesen. Sein Kern hätte im Durchmesser nicht mehr als 40 Meter gemessen. Ein tschechischer Astronom äußerte daher 1978, das Objekt, das über der Tunguska explodiert sei, sei lediglich ein Kometenfragment gewesen. Er wies darauf hin, daß der Komet Encke 1908 seine Umlaufbahn geändert habe und daß diese Änderung durch den Verlust eines Fragmentes von der Größe des Tunguska-Objektes hervorgerufen worden sein könnte.

War das Ereignis von Tunguska einmalig und einzig in seiner Art? Ein Zusammenstoß, von dem kein Krater übrigbleibt, hinterläßt auch wenig Spuren in den geologischen Befunden, mit denen Wissenschaftler etwas anfangen könnten. Drei Viertel der Erdoberfläche sind von den Wassern der Ozeane bedeckt, unter denen Krater kaum auszumachen sind. Auf dem Festland macht die Bodenerosion kleinere Krater rasch unkenntlich, und schließlich verändern sich sogar die größten Krater so sehr, daß wissenschaftlich mit ihnen nicht mehr viel anzufangen ist. Wegen dieses spärlichen Belegmaterials hielt man Meteoriteneinschläge für keinen geologisch übermäßig relevanten Vorgang, und erst, als das Zeitalter der Raumfahrt heraufdämmerte, begann man, sich ernsthaft mit der Häufigkeit des Meteoriten-«Bombardements» zu beschäftigen. Nun zeigten aus Raumflugkörpern aufgenommene und zur Erde gefunkte Bilder sehr zum Erstaunen der Geologen,

daß die Oberfläche des Mondes ganz und gar von großen und kleinen Einschlagkratern übersät ist. Diese Krater bezeugen, welch ein Bombardement es während der letzten 4,5 Millionen Jahre gegeben haben muß. Auf einem Himmelskörper wie dem Mond, auf dem es keine Atmosphäre und keinen Ozean gibt, hinterläßt sogar ein zerbrechlicher Kometenkern die Narbe seines Aufpralls. Es gibt weder Winde noch Wellen, die diese Zeugnisse kosmischer Einwirkung auslöschen. Auch die Marsoberfläche bewahrt die Spuren von Meteoritenkratern, obwohl es auf diesem Himmelskörper eine gewisse Erosion gegeben zu haben scheint. Kosmische Trümmer wie die, die unseren Nachbarplaneten und unseren eigenen Mond getroffen haben, können an unserem Planeten kaum vorbeigeflogen sein. Die Raumforschung zwingt uns zu begreifen, daß das Bombardement durch Meteoriten in unserem Sonnensystem eher die Regel als die Ausnahme war.

Einer der bekanntesten Einschlagkrater auf Erden ist der «Meteorkrater» (*Meteor Crater*) in Arizona. Als Student besuchte ich diese Einschlagstätte vor vielen Jahren, als ich von einer geologischen Exkursion zurückkehrte, die mich zum Grand Canyon geführt hatte. Die kreisrunde Vertiefung hat einen Durchmesser von 1,2 Kilometern. Man hatte noch keinerlei Meteoritenfragmente gefunden, und damals – noch vor dem Beginn des Zeitalters der Raumfahrt – waren wir keineswegs sicher, ob dieser Krater wirklich vom Zusammenstoß mit einem außerirdischen Objekt herrührte. Schließlich fand man in ihm ein Mineral namens *Koësit*. Es hat die gleiche chemische Zusammensetzung wie normaler Glassand, ist jedoch sehr viel dichter und bildet sich unter dem ungeheuren Druck von mehreren hunderttausend Atmosphären. Dermaßen hohe Druckverhältnisse treten an der Erdoberfläche nur bei Zusammenstößen mit einem aufprallenden kosmischen Objekt auf.

Gene Shoemaker, der an der Princeton Universität eine Dissertation über den Meteorkrater in Arizona abfaßte, fand Beweise dafür, daß der Aufprall vor zwanzig- bis dreißigtausend Jahren erfolgt sein müsse und daß es sich bei dem Objekt, das hier eingeschlagen war, um einen Meteoriten aus Eisen handelte. Das Ereignis von Arizona war vergleichsweise selten. Einschläge, die kleine Krater von einigen zehn Metern hervorrufen – so wie den 14 Meter messenden Haviland-Krater in Kansas oder den 51 Meter breiten Soboljew-Krater in Sibirien –, kommen viel häufiger vor. Einschlagstellen jedoch wie der Meteorkrater sind ziemlich ungewöhnlich und werden zur Touristenattraktion. Nur einige wenige Krater auf der Erdoberfläche haben mehr als 100 Meter Durchmesser, allerdings sind derart riesige Aufschlagnarben auf dem Mond oder dem Mars keine Seltenheit.

Der Kanadier Robert Grieve stellte ein Verzeichnis sämtlicher Meteoritenkrater zusammen, die man auf unserem Planeten kennt. Dabei fand er, daß die Größe dieser Krater der Häufigkeit ihres Vorkommens umgekehrt proportional ist. Mit anderen Worten: Am häufigsten kommen die kleinsten, leichtesten Meteoriteneinschläge vor, wogegen Einschläge katastrophalen Ausmaßes am seltensten sind. Die entspricht genau dem Verhältnis zwischen Größe und Häufigkeit, das Seismologen für Erdbeben, Straßenbauingenieure

für Erdbeben und Geologen für Naturphänomene jeglicher Art wie Sturmfluten, Seebeben und Vulkanausbrüche errechneten. Die Häufigkeit bzw. Seltenheit solcher Ereignisse hängt mit ihrem Ausmaß und ihrer Größe zusammen. Kleine «Sternschnuppen» erblickt man in jeder Sommernacht. Kleine Meteoriten findet man ungefähr alle zehn Jahre. Seltener sind Einschläge größerer Himmelskörper, und doch kamen auch sie im Verlauf der langen Erdgeschichte vor.

Grievess Gleichung zeigte die Wahrscheinlichkeit eines Einschlags. Der Astronom David Hughes übersetzte in einem Aufsatz, der 1979 in *Nature* erschien, die mathematische Formel in einfache, klare Aussagen: Krater von einem Kilometer Durchmesser entstehen alle 1400 Jahre, Krater von zehn Kilometern alle 140 000 Jahre und solche von 100 Kilometern Durchmesser alle 14 Millionen Jahre. Wenn die Einschlagstellen auf der Erdoberfläche so gut erhalten blieben wie auf dem Monde, fänden wir nicht nur ein paar vereinzelte, sondern Hunderte von Einschlagstellen, die von verheerenden Zusammenstößen mit Himmelsobjekten zeugten und von denen jede einzelne so riesig wäre wie das gesamte Umland von Los Angeles.

Grievess Gleichung und Hughes «Übersetzung» gaben mir die Möglichkeit, über die Wahrscheinlichkeit katastrophaler Meteoriteneinschläge nachzudenken, doch noch ein anderer Artikel brachte mir die Meteoriten fast allzu nahe, so daß es schon nicht mehr angenehm war. Ich stieß auf ihn, als ich ein Exemplar des *Scientific American* durchblätterte, den ich für meinen Sohn Andreas abonniert habe. Im fraglichen Heft zog ein Artikel von George Wetherill über «Apollo-Objekte» meine Aufmerksamkeit auf sich.

«Apollo-Objekte» sind aus Gestein bestehende Himmelskörper, deren Bahn die Erdbahn kreuzt. Sie kommen uns so nahe – und das so häufig –, daß Wetherill der Ansicht war, sie seien vielleicht die Hauptursache für alle die Krater, die während der letzten drei Milliarden Jahre auf der Erde und auf dem Monde entstanden sind. Als der Artikel erschien – dies war im Jahre 1979 –, waren mehr als zwanzig solcher «Apollo-Objekte» entdeckt worden. Doch die Gesamtzahl dieser Körper in Erdnähe muß noch wesentlich größer sein. Die größten von ihnen haben einen Durchmesser von mehr als drei Kilometern. Wahrscheinlich mehr als sechshundert bisher noch nicht gesichtete «Apollo-Objekte» messen im Durchmesser noch immer mehr als 0,5 Kilometer. Im Durchschnitt hat so ein «Apollo-Objekt», bevor es bei seiner Kreuzung mit der Erdbahn durch Kollision mit unserem Planeten zerstört oder am entgegengesetzten Ende seines Umlaufs aus dem Sonnensystem hinausgeschleudert wird, eine Lebenszeit von etwa 20 Millionen Jahren. Doch scheint es immer wieder Nachschub zu geben, so daß die Gesamtzahl der «Apollo-Objekte» mehr oder weniger gleich bleibt.

Aus welcher Quelle erneuern sich diese «Apollo-Objekte» immer wieder? Wetherill vertrat die Ansicht, es handele sich bei diesen Objekten um die verdichteten Kerne von Kometen, die ständig aus einem als Oortsche Wolke bezeichneten Bereich an der Peripherie unseres Sonnensystems Nachschub

beziehen. Schon Whipple hatte erklärt, daß die Verwandlung eines Kometenkerns aus einem Eisblock mit eingebetteten Steinen in ein nur aus Steinen bestehendes Objekt immer dann einen Schritt weitergeht, wenn ein Komet sich auf seiner Bahn der Sonne nähert. Der Komet Encke zum Beispiel, dessen Bahn um die Erde ganz der der «Apollo-Objekte» gleicht, hat jedesmal, wenn er uns wieder «besucht» (was alle drei Jahre geschieht), etwas weniger Eis. Nach 1000 weiteren «Besuchen» – mit anderen Worten: nach dreitausend Jahren – kann man erwarten, daß er alle seine flüchtigen Bestandteile verloren hat und völlig zum «Apollo-Objekt» geworden ist. Etwa in weiteren 20 Millionen Jahren muß man dann damit rechnen, daß der inzwischen ganz aus Stein bestehende frühere Kern dieses Kometen mit der Erde kollidiert.

Wetherills Artikel gab mir zu denken. Wenn einen Kometen auf einer solchen Bahn das Schicksal ereilt, auf die Erde zu stürzen, nachdem ihm alle flüchtigen Bestandteile abhanden gekommen sind, könnte er dann auch vom Himmel auf uns herabstürzen, solange er noch ein «schmutziger Schneeball» ist? Wenn er das könnte – wäre dann der Aufprall nicht viel heftiger, solange er noch nicht die Masse seines Eises verloren hat? Wie heftig wäre denn ein solcher Aufprall überhaupt?

George Wetherill, einer der namhaftesten aller Naturwissenschaftler, die sich mit den Planeten und dem planetarischen Raum befassen, führt den Vorsitz der Internationalen Gesellschaft für Planetarische Geologie. Kurz nachdem ich die Universität von Kalifornien in Los Angeles verließ, wurde er dort auf einen Lehrstuhl berufen. Von Freunden aus meiner Studienzeit hatte ich von seiner «Schatzsuche» nach Meteoriten gehört, doch unsere Lebenswege kreuzten sich erst vor ein paar Jahren in Moskau. Man hatte uns beide in die Hauptstadt der Sowjetunion gerufen, damit wir helfen sollten, einen internationalen Geologenkongreß in Moskau zu organisieren. Auf dem Plan standen fünftägige Konsultationen. Die Sowjets hörten sich höflich unsere Ratschläge an, doch wurde uns klar, daß unsere Rolle lediglich darin bestand, den Plänen zuzustimmen, die sie bereits selbst gemacht hatten, und nach denen sie auf jeden Fall vorzugehen gedachten. So hatten Wetherill und ich jede Menge Zeit, in der kleinen Bar im Restaurant des Akademie-Hotels Wodka miteinander zu trinken. Dabei bot sich mir die Gelegenheit, Wetherill zu fragen, ob wohl ein Komet die Erde treffen könne.

Ja, antwortete Wetherill. Mit seiner sanften Stimme hatte er alle Mühe, gegen die Musik der Band anzukämpfen, die in keinem russischen Hotel-Restaurant fehlen darf. Kometen seien bereits mit dem Mond und wahrscheinlich auch mit der Erde zusammengestoßen. Ja – es waren wohl Kometen mit ihrem massiven Eiskern und ihrer hohen Geschwindigkeit, die mit der Erde frontal zusammenstießen und so die größten aller Krater hervorriefen. Und wie hoch war die Energie eines solchen Kometeneinschlages?

Was die Aufprallenergie eines Kometen von der Größe des Halleyschen anging, stellte Wetherill einige *Ad-hoc*-Berechnungen an. Die Aufprallenergie entspricht der halben Masse des Objektes mal dem Quadrat seiner Geschwindigkeit. Wenn der Halleysche Komet mit einem Tempo von 40 Kilometern

pro Sekunde auf die Erde träfe, müßte seine Einschlagenergie der Explosion von 400 Milliarden Kilotonnen Trinitrotoluol (TNT) entsprechen oder 20 Milliarden Mal stärker sein als die der Atombombe von Hiroshima. Die Oberfläche der Erde mißt etwa 500 Millionen Quadratkilometer. Ein Zusammenprall mit dem Halleyschen Kometen würde mithin das Äquivalent von 500 Hiroshima-Bomben pro Quadratkilometer Erdoberfläche freisetzen. Dies wäre mehr als hinreichend, um alles Leben auszulöschen. Glücklicherweise würde sich die Kollisionsenergie auf den Bereich der Einschlagstelle konzentrieren, so daß eine solche Kollision noch nicht notwendigerweise den Weltuntergang bedeuten würde. Dennoch wären die Folgen eines solchen Zusammenstoßes wirklich furchteinflößend.

Natürlich machte ich mir sofort Sorgen wegen der Rate des Kometen-Bombardements. Wetherill erklärte mir: «Es gibt zwei Arten und Weisen, das zu sehen.» Paul Weissmann vom *Jet Propulsion Laboratory* an der Technischen Hochschule von Kalifornien hatte berechnet, daß die Aussichten für einen Zusammenstoß der Erde mit einem Kometen etwa zwei zu einer Milliarde stehen. «Dies kann man in eine Rate oder Chance umsetzen», äußerte Wetherill. «Die Chancen, daß Sie in einem Spielautomaten einen Jackpot treffen, stehen eins zu eintausend. Wenn Sie Tag und Nacht an so einem einarmigen Banditen spielen und im Abstand von jeweils zwei Minuten tausendmal den Hebel betätigen, sollten Sie den Jackpot in zweitausend Minuten oder dreiunddreißig Stunden treffen. Vielleicht gewinnen Sie nichts dabei, doch die Wahrscheinlichkeit ist gegeben, daß Sie alle anderthalb Tage einmal den Jackpot treffen!»

Ebenso verhält es sich mit Kometeneinschlägen. Vielleicht stehen die Chancen eins zu einer Milliarde, daß ein bestimmter Komet die Erde trifft, doch jedes Jahr kreuzen etwa neunhundert Kometen die Erdbahn. Jeder von ihnen ist groß genug, um einen Krater von 10 Kilometern Durchmesser und mehr zu schlagen. Für jeden einzelnen stehen vielleicht die Chancen eins zu einer Milliarde, doch da es neunhundert sind, ist die Möglichkeit eines Zusammenstoßes schon viel größer. Die wahrscheinliche Rate liegt vielleicht bei einer Kollision alle 5 oder 10 Millionen Jahre. Doch nur ein kleiner Teil der im Raum kreisenden Kometen ist so groß, daß er imstande ist, Krater von mehreren hundert Kilometern im Durchmesser hervorzurufen. So beträgt die Chance, mit einem solchen Ungetüm zusammenzuprallen, nur eins bis zwei zu einer Milliarde Jahre.

Eine zweite Möglichkeit, die Rate der Kometenkollision zu berechnen, besteht darin, sich über die Größe der Krater Klarheit zu verschaffen, die ein Komet einer bestimmten Größe – der Halleysche beschäftigte mich mehr denn je – hervorruft. Dann kann, von der Kratergröße ausgehend, Grieses Formel für die Relation von Größe und Häufigkeit angewendet werden. Wetherill verwies mich auf ein Buch mit dem Titel: *Impact and Explosion Cratering* (Kraterbildung durch Einschläge und Explosionen), das Wissenschaftler vom *Jet Propulsion Laboratory* der Technischen Hochschule von Kalifornien herausgegeben hatten.

Ich suchte in diesem Buch nach einer Antwort. Die Autoren hatten auf

der Grundlage von Laborversuchen und Atombombentests eine systematische Relation zwischen Einschlagenergie und Kratergröße hergestellt. Der Meteorokrater von Arizona mit seinem Durchmesser von 1,2 Kilometern war durch eine Einschlagenergie entstanden, die der Explosivkraft von 15 Megatonnen Trinitrotoluol (TNT) entsprach. Dies könnte ein aus Eisen bestehender Meteorit von 42 Metern Durchmesser bewirkt haben. Grieses Formel zufolge ereignete sich eine so kleine Kollision alle zweitausend Jahre.

Gene Shoemakers Schätzung war vorsichtiger und lag für Einschläge von der Stärke dessen, der den Meteorokrater hervorgerufen hatte, bei einmal alle fünftausend Jahre. Auch er berechnete die wahrscheinliche Häufigkeit anhand der Einschlagenergie. Demnach konnte ein Aufschlag mit dem Äquivalent einer Sechskilotonnenbombe jedes Jahr eintreten, ein 200-Kilotonnen-Einschlag war alle 25 Jahre zu erwarten, ein Megatonneneinschlag einmal in einem Jahrhundert und ein Aufprall im Bereich von zehn Megatonnen (vergleichbar dem Tunguska-Ereignis) ungefähr einmal in tausend Jahren.

Wenn es also während der letzten paar tausend Jahre der Menschheitsgeschichte mehrere Kollisionen gab, die sich mit dem Einschlag über der Tunguska vergleichen ließen, liegen dann auch historische Berichte über derartige Geschehnisse vor? Das ist unwahrscheinlich, denn die meisten Begebenheiten dieser Art, wenn sie sich denn ereigneten, dürften sich über dem Ozean oder über wenig besiedelten Gebieten abgespielt haben. Allerdings läßt mich der Gedanke an die biblische Erzählung vom Untergang der beiden Städte Sodom und Gomorrha nicht los. Wir erfahren hier (*Genesis* [1. Mos.] 19, 24 f.), daß Gott «Feuer und Schwefel» auf die beiden sündigen Städte regnen ließ, so daß diese im Handumdrehen niederbrannten. Könnte man dies als eine moralisierende Schilderung eines «Todes vom Himmel» durch Meteoriteneinschlag betrachten, der die beiden Städte ereilte?

Aber Meteoriteneinschläge, die sich nur einmal in mehreren tausend Jahren wiederholen, sind nicht spektakulär genug, um geologisch auffällige Spuren zu hinterlassen. Allerdings ist die Erdgeschichte nahezu eine Million Male so alt wie die Geschichte der Menschheit, und es gibt doch Beweise für Einschläge von größerer Wucht in Form von Einschlagkratern, Tektiten und ähnlichen Zeugnissen. Beispielsweise ist die Aufprallenergie eines Kometen von der Größe des Halleyschen millionenmal größer als die Explosionskraft der stärksten Kernwaffe, die bisher im Test war. Wenn man, von der Explosionskraft heutiger Atom- und Wasserstoffbomben ausgehend, Vergleiche mit hohen Einschlagenergien anstellt, so führt auch dies zu gewissen Ungenauigkeiten. Doch eine auf denkbar soliden Informationen beruhende Schätzung besagt, daß der 400-Megatonnenaufprall eines Objektes von der Größe des Halleyschen Kometen einen Krater von 250 Kilometern Durchmesser hervorrufen würde. Bringt man dies mit der Formel in Verbindung, die Grieve für die Kraterbildungsrate aufstellte, so folgt, daß die Chance einer Kollision zwischen der Erde und einem außerirdischen Objekt von einer Trillion Tonnen etwa bei einmal in 100 Millionen Jahren liegt. Uns kurzlebigen Wesen scheinen 100 Millionen Jahre eine Ewigkeit, doch die Erde ist 4,5

Milliarden Jahre alt! Schon seit dem Paläozoikum vor etwa 600 Millionen Jahren existieren relativ hochentwickelte Lebensformen. Und seitdem müssen mehrere Katastrophen der angegebenen Größenordnung unseren Planeten heimgesucht haben. Zumindest ein Krater – er mißt 100 Kilometer im Durchmesser und liegt in Ontario, Kanada – bezeugt, daß es einen Aufprall von entsprechender Stärke gegeben haben muß.

Diese rein hypothetischen Betrachtungen, die ich über die Möglichkeiten derartiger Katastrophen anstellte, fanden natürlich keinerlei Unterstützung durch stichhaltiges Faktenmaterial. Ich war noch in keinem Krater von 250 Kilometern Durchmesser umherspaziert und hatte Dringenderes zu tun, als mich naturwissenschaftlichen Gedankenspielerien hinzugeben. Im Jahre 1979 lud mich die chinesische Regierung ein, als Berater bei der Modernisierung geologischer Forschungs- und Lehrprogramme behilflich zu sein. Deshalb brachten meine Frau Christine, unsere vier Kinder und ich sechs Monate in meinem Heimatlande zu, das durch die «Große Proletarische Kulturrevolution» vollkommen verwüstet war. Ich reiste umher, hielt Vorlesungen und nahm an endlosen Sitzungen, Beratungen und Diskussionen teil. Die praktischen Probleme des Landes, in dem ich geboren war, beanspruchten mich völlig, und sie waren dermaßen real, dermaßen dringend, daß ich nicht mehr dazu kam, über Kometen oder über das Massensterben am Ende der Kreidezeit nachzudenken. Doch packte mich die in der Luft liegende Aufregung erneut, als ich im September nach Europa zurückkehrte. Die Auseinandersetzung um die Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär hatte neue Impulse bekommen, denn im selben Jahre waren zwei neue Hypothesen über den Massentod am Ende der Kreidezeit veröffentlicht worden. Die eine vertrat mein früherer Student Hans Thierstein zusammen mit Wolf Berger, seinem Kollegen im Scripps-Institut. Für die zweite hatten sich Walter Alvarez, sein Vater Luis Alvarez und ihre Mitarbeiter in Berkeley stark gemacht.

Thierstein und Berger waren der Ansicht, die Weltmeere hätten am Ende der Kreidezeit eine große Dosis – oder wie sie es nannten: eine «Injektion» – von Süßwasser aus der Arktis erhalten. Diese Idee war nicht völlig neu. Eine ähnliche Auffassung hatte schon früher der Paläontologe Steve Gardner verfochten, der im arktischen Bereich heimische, kreidezeitliche *Diatomeen* (Kieselalgen) in den frühesten tertiären Sedimenten gefunden haben wollte. Sachverständige haben diese «Entdeckung» allerdings inzwischen verworfen.

Dennoch griffen Thierstein und Berger auf die Idee der Süßwasser-Injektion zurück, weil sie sich dazu eignete, zwei Anomalien zu erklären. Die erste war das seltsame Vorkommen des Nannoplanktons *Braarudosphaera* in den frühesten Sedimenten des Tertiärs. Verschiedene Arten dieser Gattung findet man heute in Gewässern mit ungewöhnlich niedrigem oder außergewöhnlich hohem Salzgehalt – beispielsweise im Schwarzen Meer, dessen Salzgehalt sehr viel niedriger ist, oder im Roten Meer, dessen Salzgehalt sehr viel höher ist als der aller übrigen Meere. Daß es in ozeanischen Ablagerungen, dort, wo der Salzgehalt an sich hätte normal sein müssen, ganz früh im

Tertiär eine solche Nannoplanktonart gab, war für Thierstein und Berger ein sicheres Zeichen dafür, daß das Wasser der Meeresoberfläche durch eine Süßwasser-Injektion verdünnt worden sein muß. Der zweite Beweis, auf den sich Thierstein und Berger stützten, war die Sauerstoffisotopenanomalie beiderseits der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär. Nick Shackleton hatte sie entdeckt, und später war sie von einer Gruppe von Scripps-Wissenschaftlern bestätigt worden, die eine ganze Reihe von Proben untersucht hatten. Die Tatsache, daß der Gehalt von Sauerstoff 18 in den frühesten känozoischen Nannofossilien zurückging, deutete nach Harald Ureys Paläotemperaturtabellen auf einen Anstieg der Meerwassertemperatur um unglaubliche 5 Grad Celsius hin. Weil aber auch dem Süßwasser die schweren Sauerstoffisotope fehlen, konnte dieses Signal auch bedeuten, daß der Ozean einen gehörigen Schuß Süßwasser abbekommen hatte. Da ein plötzlicher Anstieg der Meerwassertemperatur um 5 Grad Thierstein und Berger unmöglich erschien, zogen die beiden Wissenschaftler ihre Idee einer Süßwasser-Injektion vor.

Nach ihrer Hypothese war das arktische Becken während der Kreidezeit ein gewaltiger Süßwassersee, den eine Landbarriere von den Weltmeeren trennte. Am Ende der Kreidezeit zerbrach diese Barriere durch ein heftiges Erdbeben, das Süßwasser strömte in die Ozeane und verringerte deren Salzgehalt an der Meeresoberfläche. Nur wenige Meerestiere können sich einem verringerten Salzgehalt anpassen. Deshalb ließ die Zufuhr des Süßwassers die Mollusken ebenso wie die *Ammoniten*, das Zooplankton und das Phytoplankton (mit anderen Worten: die tierischen und pflanzlichen Planktonarten) sterben. Nur die Nannoplanktonart *Braarudosphaera* und einige ihrer zähen Verwandten überlebten.

Als ich diese geniale Idee in einem Sonderdruck des betreffenden *Nature*-Artikels las, den ich bei meiner Rückkehr aus China in einem Haufen von Briefen auf meinem Schreibtisch fand, war ich zunächst begeistert. Doch als ich die Angelegenheit dann noch einmal überdachte, mußte ich das von den beiden Gelehrten erhobene Postulat, so glänzend es schien, doch wieder zurückweisen. Die Weltmeere sind so riesig, daß sich ihr Salzgehalt nicht ohne weiteres ändern läßt. Sämtliches Süßwasser aus einem See von der Größe des arktischen Beckens hätte vielleicht ihr Oberflächenwasser ein wenig verdünnen können, doch den Salzgehalt des gesamten Ozeans hätte es schwerlich beeinflußt. Und Shackleton hatte mit seinen Daten die gleiche Sauerstoffanomalie nicht nur für die Lebewesen an der Meeresoberfläche, sondern auch auf dem Meeresboden nachgewiesen. Daraus ergibt sich wohl die Folgerung, daß die Blüte der *Braarudosphaera* nicht notwendigerweise auf eine Abnormität des Salzgehaltes hindeutet.

Ich begegnete Thierstein und Berger gegen Ende September, als wir uns auf Barbados trafen, um Bohrstellen für das JOIDES-Tiefseeprojekt auszusuchen. Wir waren Gäste der meeresbiologischen Station der McGill-Universität von St. James an der Westküste der Insel. Nach einem langen Tag voller Sitzungen waren die meisten von uns viel zu müde, um in die Stadt zu gehen

und sich dem Lärm der Kalypsomusik auszusetzen. Statt dessen begaben wir uns in ein kleines Restaurant ganz nahe am Hafen. Bei Gin und Tonicwater setzte ich Berger und Thierstein auseinander, welche Einwände ich gegen ihre Hypothesen hätte. Berger zuckte mit den Schultern. Er ist ein Mann voller Ideen, und es machte ihm nichts, wenn man ihn kritisiert. Er antwortete mir mit einem Vergleich, den der Wissenschaftsautor C. P. Snow einmal gebraucht hatte: Ideen sind für Wissenschaftler wie Geliebte für Schürzenjäger. Hat einer viele davon, macht es ihm nichts aus, ein paar zu verlieren. Doch wie auch immer: Die Isotopendaten erforderten eine Erklärung. Vielleicht bezeugte ja das Signal, was es zu bezeugen schien – einen außergewöhnlichen und katastrophalen Temperaturanstieg. Ich erzählte den beiden von de Laubenfels. Berger lächelte und wies mich darauf hin, daß ich ja nicht der einzige wäre, der eine «E. T.» – Hypothese (eine Hypothese von einer extraterrestrischen Ursache des großen Sterbens am Ende der Kreidezeit) verträte. Ein Geologe aus Berkeley, Walter Alvarez, hatte auf dem Frühlingstreffen der Amerikanischen Geologischen Vereinigung 1979 von der Entdeckung extraterrestrischer Metallspuren im «Grenzton» von Gubbio berichtet, wo Jahre zuvor erstmals nachgewiesen worden war, daß es keine zeitliche Kluft im Grenzbereich zwischen Kreidezeit und Tertiär gab. Alvarez und seine Leute vertraten die Ansicht, sie hätten Beweise gefunden, die eine ältere, schon früher von Otto Schindewolf, einem Tübinger Paläontologen, geäußerte Ansicht stützten, wonach die vernichtende Katastrophe am Ende der Kreidezeit von einem explodierenden Stern hervorgerufen worden sei.

Ermutigt von dieser exotischen Theorie sowie von Gin und Tonic, brachte ich meine eigene Lieblingsvorstellung an. «Nein, es war keine Supernova», wandte ich ein. «Es muß ein Komet gewesen sein – ein Komet, groß genug, um das Meer mit genügend Zyaniden zu verseuchen, so daß praktisch das gesamte ozeanische Plankton am Ende der Kreidezeit umgebracht wurde.»

Meine Freunde wollten mir nicht glauben, daß ich es ernst meinte. Doch wie auch immer – sie rieten mir, an einer Veranstaltung in Kopenhagen teilzunehmen. Frau Tove Birkelund von der Kopenhagener Universität wollte dort ein Symposium mit dem Titel *Cretaceous-Tertiary Boundary Events* (Ereignisse an der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär) veranstalten. Es sollte einen Monat später – im Oktober 1979 – stattfinden. Dies paßte sehr gut, denn die bemerkenswert vollständigen Sediment-Schichtfolgen von Stevn's Klint und anderen anstehenden Felsen bei Kopenhagen hatten zentrale Bedeutung für unser Verständnis des Grenzbereichs zwischen Kreidezeit und Tertiär, und Frau Birkelund hatte erheblichen Anteil an der Deutung und Auswertung der dortigen Befunde. Der Begriff «Ereignisse» im Titel der Veranstaltung spiegelte die Betrachtungsweise der Organisatorin des Symposiums, die sich von ihrer Auffassung nicht trennen wollte, daß eher eine ganze Reihe von Ereignissen als eine einzige Katastrophe für das große Sterben am Ende der Kreidezeit verantwortlich war.

Thierstein sollte seine und Bergers Ansicht bei diesem Symposium vortragen. Auch Walter Alvarez stand auf dem Programm. Thierstein und Berger hofften, auch ich würde meinen Beitrag zur Belebung der Diskussion leisten, indem ich etwas über die Vergiftung mit Zyaniden zum besten gäbe. Obwohl ich an jenem Abend schon einiges getrunken hatte, war ich immer noch nüchtern genug, mich nicht in die Teilnehmerliste einzutragen. Ich war nicht der einzige, der die Aufregung, die das alles auslöste, etwas lockerer sah. Als das von Frau Birkelund veranstaltete Treffen immer näher kam, brachte die explosionsartige Verbreitung ausgefallener Ansichten zwei Humoristen, Peter Vogt und John Holden, auf die Idee, auf das Kopenhagener Symposium eine kurze Satire abzufassen, deren Titel lautete:

Die Artenausrottung am Ende der Kreidezeit: Eine Studie vielfältig überdrehter Arbeitshypothesen.

Was den Massenmord am Ende der Kreidezeit angeht, folgern wir, daß die Daten gefährlich sein können. Ohne Rücksicht darauf, ob man es mit verlässlichen Quellen von hoher Qualität zu tun hat, haben neue Daten noch nie eine alte Theorie zu Fall gebracht, sondern stellten eher eine Verlockung dar, immer wieder neue und ausgefallenerere Thesen vorzutragen. Wir illustrieren dieses Phänomen (in aller Bescheidenheit als 'Vogt-Holden-Effekt' bezeichnet), indem wir die Liste um mehrere Möglichkeiten erweitern – einschließlich der einer spätkreidezeitlichen Flotte Noahs, von der nur eine Arche übrigblieb, des Manipulierens außerirdischer Lebewesen und der Existenz einer Ausrottungsmaschine. Irgendwie gibt es wissenschaftliche Bereiche, wo die Daten härter und härter werden, die Theorien jedoch, die sie deuten sollen, dafür immer weicher.

Über die Ereignisse dieses Oktober-Symposiums berichtete mir Anna Katharina Perch-Nielsen von Salis. Mit einem Dänen verheiratet, hatte sie an der Universität Kopenhagen unterrichtet, bevor sie sich unserer Fakultät an der ETH Zürich anschloß. Als Spezialistin für Nannoplankton, als Expertin für den Übergang vom Mesozoikum zum Känozoikum sowie als Vorsitzende der internationalen Arbeitsgruppe für den Grenzbereich zwischen Kreidezeit und Tertiär hatte sie selbstverständlich an dem von Tove Birkelund organisierten Treffen teilgenommen. Ich begab mich zu ihr, um nach ihrer Rückkehr von dieser Veranstaltung mit ihr zu diskutieren. Vogt und Holden hatten sich nicht gezeigt. Keine Institution, die Forschungsstipendien vergab, hatte ihnen die Reisekosten bewilligt, um ihre Satire herauszubringen. Thierstein und Alvarez dagegen erregten ungeheures Aufsehen, und beide trugen ihre hochinteressanten Ideen vor. Doch niemand war wirklich von der Richtigkeit dieser Hypothesen überzeugt, wie Frau Perch-Nielsen berichtete. So war es nur gut und richtig, daß ich nicht auch nach Kopenhagen gereist war und meine Gedanken über giftige Kometen zurückgehalten hatte.

So standen die Dinge, als mir eines Morgens bei meinen allwöchentlichen Besuchen in unserer Institutsbibliothek ein von den beiden Astronomen Vic Clube und Bill Napier verfaßter Artikel in die Hände fiel, der in *Nature* abgedruckt war. Die Oortsche Wolke, die Whipple als sich immer wieder erneuernde «Quelle» von Kometen und «Apollo-Objekten» identifiziert hatte, liegt an der äußersten Peripherie des Sonnensystems, mehr als tausend Mal weiter von der Sonne entfernt als der Planet Pluto. Kommt ein Stern dieser Wolke zu nahe, werden Kometen von ihr «losgeschlagen» und begeben sich auf ihre lange Reise durch den inneren Bereich des Sonnensystems. Beispielsweise wurde so der Komet Kohutek auf den Weg gebracht, so daß er uns 1972 besuchen konnte. Von der Oortschen Wolke nimmt man an, daß sie aus Trümmern besteht, aus abseitigen Überbleibseln der Urwolke, die einst zusammengebrochen war und dabei das Sonnensystem aus sich entstehen ließ. Clube und Napier allerdings behaupteten in ihrem Artikel, daß Kometen im interstellaren Raum, nämlich in den Spiralarmen unserer Milchstraße, entstünden. Sie seien aus diesen Spiralarmen gelöst worden, als unsere Sonne diese durchwanderte. Jeder «Fang» dieser Art liefere der Oortschen Wolke neuen Kometennachschub und vergrößere so die Chance, daß wiederum ihr «entronnene» Kometen schließlich auf einem Kollisionskurs mit der Erde endeten.

Neue Berechnungen eines japanischen Astronomen hatten die Vermutung nahegelegt, daß Kometen mit einer langen Periode, also solche, die uns nur sehr selten «besuchen», vor 10 Millionen Jahren durch unser Sonnensystem dem interstellaren Raum entrissen worden sein könnten. Clube und Napier wollten herausfinden, ob das Sonnensystem damals tatsächlich gerade durch einen Spiralarm gewandert war. Sie fanden, daß dies wirklich zutraf. Das Sonnensystem war vor etwa 20 Millionen Jahren in einen großen, auffälligeren Spiralarm eingetreten, den die Astronomen «Gould's Gürtel» getauft haben, und vor 10 Millionen Jahren war es aus ihm wieder aufgetaucht. Die beiden Astronomen äußerten deshalb kühn die Vermutung, daß das, was die Sonne und ihre Trabanten damals und bei früheren Gelegenheiten ähnlicher Art «eingefangen» hatten, die Ursache periodisch wiederkehrender Katastrophen der Erdgeschichte war.

Inzwischen wurde diese von Clube und Napier vorgebrachte Hypothese angefochten, weil Kometen allem Anschein nach nicht aus dem interstellaren Raum stammen. Ihre chemische Zusammensetzung ist vielmehr typisch für unser Sonnensystem. Dennoch ermutigte mich ihr eigener Mut zum Handeln. Für meinen ersten Auftritt in der Arena der Diskussion über das Massensterben am Ende der Kreidezeit wählte ich dasselbe Journal, *Nature*, in dem Clubs und Napiers Artikel veröffentlicht worden waren. Ein früherer Herausgeber von *Nature* hatte mir über die liberale Veröffentlichungspolitik dieses hochangesehenen wissenschaftlichen Wochenblattes berichtet: «Wir bringen alle originellen Ideen, sofern sie nicht pornografisch sind.» Natürlich gab es auch ein paar ganz schlechte Artikel, doch was waren sie im Vergleich zu Watsons und Cricks aufsehenerregender Veröffentlichung über die

Desoxyribonukleinsäure oder zu Vines und Matthews Theorie über die Meeresboden-Ausdehnung, die ebenfalls in *Nature* publiziert worden waren! Also entschloß ich mich, und dies war offensichtlich etwas voreilig, meinen Hut in den Ring zu werfen, und sandte ein Manuskript ein, das den Titel trug: *Terrestrial Catastrophe Caused by Cometary Impact at the End of the Cretaceous* (Erdkatastrophe durch Kometeneinschlag am Ende der Kreidezeit).

Zunächst nahm ich mir noch einmal de Laubenfels' Artikel über das Aussterben der Dinosaurier vor. Außerdem las ich noch einmal Whipples Aufsatz über Kometen und Hughes' Bericht über die Entstehung von Kratern bei Einschlägen. Während ich alle diese Aufsätze mit Hilfe unserer Bibliothekarin, Esther Chappuis, ausfindig machte, stieß ich auf einen Artikel von Harold Urey, der den Titel trug: *Cometary Collision and Geologic Periods* (Zusammenstöße mit Kometen und die Erdzeitalter). Sein Entstehen verdankte er der Kontroverse um Velikovskys *Worlds in Collision* (Welten im Zusammenstoß), einem Bestseller, der den Gedanken an katastrophale Zusammenstöße mit Kometen außerordentlich populär gemacht hatte.

Immanuel Velikovsky, der im zaristischen Rußland geboren wurde und ein hervorragender Altertumskundler ist, hatte einen ganz und gar unorthodoxen Ansatz, was die Naturwissenschaften betraf. Er ging davon aus, daß sämtliche Berichte antiker Chronisten und Historiker wortwörtlich und buchstäblich die Wahrheit enthielten. Wenn der griechische Geschichtsschreiber Herodot (um 485 bis nach 430 v. Chr.) behauptete, die Erddrehung habe sich geändert, dann hatte sie das, und wenn es in der Bibel heißt, Sonne und Mond hätten bewegungslos «still gestanden» (*Josua* 10, 12–14), dann mußte es genau so gewesen sein. Im Gegensatz zu den Geologen war es Velikovsky völlig einerlei, ob die beschriebenen Phänomene physikalisch möglich waren oder nicht. Katastrophen, welche die Erde heimsuchten, hatten ihm zufolge ihre Ursache in einer Reihe von Zusammenstößen zwischen Planeten und Kometen. Der Oberbösewicht war dabei der Planet Venus, der – so behauptete wenigstens Velikovsky – in Wahrheit ein verkappeter Komet war. Naphtha aus seinem Schweif sei zur Erde gefallen und habe den in der Bibel geschilderten Feuer- und Schwefelregen auf Sodom und Gomorrha (*Genesis* 1. Mos. 19,24) verursacht. Derselbe Planet – oder, nach Velikovsky, Komet – habe auch die Teilung des Roten Meeres bewirkt, die es angeblich Moses ermöglichte, mit seinen Israeliten aus Ägypten zu entkommen (*Exodus*, 2. Mos. 14,21 f.). Den Autor kümmerte es in keiner Weise, daß Venus gar keinen Schweif hat und daß es sich bei diesem Himmelskörper um einen soliden Planeten handelt, wie auch unsere Erde einer ist.

Velikovskys Bücher waren als Science Fiction hervorragend, ja vielleicht haben sie auch ihre Meriten im Vergleich antiker Mythen. Ärgerlich war nur, daß der Verlag seine Bücher unter «Naturwissenschaft» in seinen Ankündigungen führte. In der Verwirrung, die dies hervorrief, wandten sich die Medien an bekannte Naturwissenschaftler, um deren Ansichten zum Thema Velikovsky zu erfragen. Sogar Albert Einstein wurde um einen Kommentar angegangen. Seiner Ansicht nach war Velikovskys Buch «nicht wirklich

schlecht. Der Nachteil ist nur: Es ist verrückt.» Auch der Nobelpreisträger Harold Urey zerbrach sich den Kopf über die Angelegenheit und brachte eine ganz neue Version von «Welten im Zusammenstoß» heraus – eben jenen Aufsatz, über den ich in unserer Bibliothek gestolpert war.

Ureys naturwissenschaftliche Methode war absolut einwandfrei. Er begann mit der physikalisch keineswegs abwegigen Prämisse, daß ein Komet von der Größe des Halleyschen mit der Erde zusammenstoßen könne, und erforschte die Folgen, die so ein Ereignis haben müßte, wenn es denn einträte. So gelangte er zu dem Resultat, daß die durch einen solchen Zusammenstoß hervorgerufene Zerstörung der Lebensverhältnisse auf Erden nachgerade entsetzlich wäre. Also konnten Zusammenstöße mit Kometen in der Tat weithin Verwüstung gebracht haben – nicht aber in biblischer Zeit, wie Velikovsky annahm, sondern sie könnten ein Massensterben von Tieren und Pflanzen in erdgeschichtlicher Zeit bewirkt haben, wie es sich tatsächlich im geologischen Befund abzeichnet. Urey wies auf das Massensterben am Ende der Kreidezeit als Beispiel hin. Das Aussterben der Dinosaurier könnte mithin das Ergebnis eines Kometeneinschlages gewesen sein. Doch Urey bestand nicht darauf, daß derartige Kometenkatastrophen sich auch wirklich ereignet hatten.

Ureys Gedanken wurden erstmals in *The Saturday Review* und später in Form einer kurzen Notiz in *Nature* veröffentlicht. Doch die Gemeinschaft der Naturwissenschaftler ignorierte beide Artikel, weil naturwissenschaftliche Ideen, gute wie schlechte, dazu verdammt sind, vergessen zu werden, es sei denn, man erfindet Tests, die sie bekräftigen oder widerlegen können.

Mit diesen Lehren im Gedächtnis und sämtlichen Zitaten im Zettelkasten begann ich zu schreiben. Der erste Abschnitt des Artikels sollte zeigen, wie groß die Katastrophe war, die sich am Ende der Kreidezeit ereignete. Zu viele Arten waren in zu kurzer Zeit unter Umweltbedingungen ausgerottet worden, die sich zu plötzlich und drastisch verändert hatten, als daß irdische Prozesse dafür verantwortlich gemacht werden könnten. Im zweiten Abschnitt erörterte ich die Statistiken über die Häufigkeit von Kometenkollisionen sowie die Folgen eines Zusammenstoßes der Erde mit einem Objekt von der Größe des Halleyschen Kometen. Im dritten Abschnitt untersuchte ich die Konsequenzen der Vergiftung durch Meeresverunreinigungen, einschließlich einer möglichen Vergiftung der schwimmenden Meeresorganismen durch Zyanide und Veränderungen der Seewasserchemie. Dies verunmöglichte die Vermehrung des Planktons, was zu einem Zusammenbruch der Nahrungskette führte. Chemische Umweltgifte mußten von Oberflächenströmungen über den Ozean getragen worden sein, argumentierte ich. Jene Organismen im Meer, welche die höchsten Verluste erlitten – *Ammoniten*, *Belemniten*, *Oberflächen-Foraminiferen* und *Nannoplankton* –, waren samt und sonders Schwimmer, die sich in den äquatorialen Strömungen des Ozeans tummelten, während die benthischen Ozeanbewohner weitgehend verschont blieben. Freilich hätte die Vergiftung des Ozeans allein kaum ausgereicht, die Tiere an Land umzubringen. Den Vermutungen von de Laubenfels,

McLean und anderen folgend, schrieb ich den Untergang der großen Wirbeltiere einer kurzfristigen, aber massiven Überhitzung zu. Kleine oder im Wasser lebende Tiere auf den Kontinenten überlebten, weil sie die Hitze besser ertragen oder sich vor ihr in Sicherheit bringen konnten.

In der Hoffnung, nicht auch sofort in Vergessenheit zu geraten, schlug ich eine Reihe von Tests vor, die ich für geeignet hielt, meine Ideen zu überprüfen, und rief zur Suche nach einem Einschlagkrater auf. Vor Weihnachten sandte ich das Manuskript an den Herausgeber von *Nature*. Außerdem schickte ich eine Kopie an Frau Perch-Nielsen, die sich auf dem Kongreß in Kopenhagen so viele ausgefallene Ideen hatte anhören müssen und mich nun vor einigen lächerlichen Fußangeln bewahrte. Sie fertigte Kopien meines Manuskriptes an und verschickte sie an sämtliche Mitglieder ihrer Arbeitsgruppe über den Grenzbereich zwischen Kreidezeit und Tertiär. Außerdem sandte ich selbst ein paar Kopien an Kollegen, die damals aktiv an der Auseinandersetzung über dieses Problem beteiligt waren.

Die Resonanz ließ nicht lange auf sich warten. Ein holländischer Kollege, Jan Smit, wollte gern wissen, wie ich es fertiggebracht hätte, auf fast dieselben Ideen zu kommen wie er selbst. Sein Manuskript, das er zusammen mit einem anderen Kollegen, J. Hertogen, abgefaßt hatte, wurde einen Monat später, im Januar 1980, an *Nature* eingesandt. Der Verlag nahm sofort mit mir Kontakt auf und erbat sich ein wenig Aufschub für die Veröffentlichung meiner Studie, damit beide Aufsätze Seite an Seite nebeneinander im selben Heft erscheinen konnten.

Unmittelbar nach Neujahr fiel mir ein Zeitungsausschnitt über einen Bericht in die Hände, den das Alvarez-Team auf dem Dezembertreffen der Amerikanischen Gesellschaft zur Förderung der Naturwissenschaft vorgelegt hatte. Nach weiteren Analysen von Spurenelementen hatten sie ihre Idee einer Supernova (mit anderen Worten: einer Fixsternexplosion) aufgegeben und machten statt dessen den Einschlag eines 100 Millionen Tonnen schweren Asteroiden von 10 Kilometern Durchmesser für das Massensterben am Ende der Kreidezeit verantwortlich. Bald darauf erhielt ich einen Sonderdruck des betreffenden Aufsatzes und einen langen Brief von Walter Alvarez. Sie hatten ihr Manuskript im November 1979 abgeschlossen gehabt, als ich gerade an meinem eigenen zu schreiben begonnen hatte.

Ebenfalls im November 1979 verkündete Cesare Emiliani, der ganz unter dem Eindruck der Daten Shackletons stand, die auf eine endkreidezeitliche Erwärmung des Ozeans hindeuteten, in einen Vortrag an der Universität von Kalifornien, ein katastrophaler Temperaturanstieg habe die Massentötung der Dinosaurier und des Planktons verursacht.

So verfochten schließlich vier Aufsätze – die Artikel von Smit und Hertogen, Alvarez u.a., Emiliani und von mir – die These einer außerirdischen Ursache des Massensterbens am Ende des Mesozoikums. Sie erschienen im Frühjahr 1980 innerhalb eines Monats in drei verschiedenen Zeitschriften. Das mag manchem als bloßes Spiel des Zufalls erscheinen, so manch anderen aber auch argwöhnen lassen, daß wir durch eine naturwis-

senschaftliche Gerüchteküche voneinander Wind bekommen hatten und uns nun gegenseitig den Rang der Erstveröffentlichung streitig machen wollten. Doch als ich meinen eigenen Aufsatz abfaßte, hatte Jan Smit noch mit keinem Wort verraten, wie er über Meteoriteneinschläge dachte. Alvarez und seine Gruppe sprachen damals noch immer von Supernova-Explosionen, und ich hatte keinen Schimmer, daß sich auch Emiliani über das von Shackleton vorgelegte Datenmaterial den Kopf zerbrach und ebenfalls das Problem zu lösen versuchte, das uns alle gemeinsam, aber unabhängig voneinander beschäftigte. Die gleichzeitige Veröffentlichung nahezu identischer Theorien ist weder Zufall noch das Ergebnis irgendwelcher Kungelei. Wenn Daten auf etwas hindeuten, das auf der Hand liegt, kommen alle die, die am schnellsten reagieren, zur selben Zeit mit derselben Antwort heraus.

Neutronen als Detektive

Im Jahre 1958 fand man in einem verlassenen Steinbruch unweit einer kleinen Stadt in New Brunswick, Kanada, die Leiche eines ermordeten jungen Mädchens, das noch keine zwanzig Jahre alt war. Des Mordes verdächtig war ein junger Mann namens John Vollmer. Zeugen hatten beobachtet, wie er das Mädchen an dem Abend, an dem es zuletzt lebend gesehen worden war, in einem Drugstore angesprochen hatte; wieder andere hatten sie in seinem Wagen aus dem Stadtkern fortfahren sehen, und ein Farmer, der an jenem Abend spät nach Hause kam, hatte beobachtet, daß Vollmers Wagen in dem Steinbruch parkte, wo später der Leichnam des toten Mädchens gefunden wurde. Vollmer gab das alles zu, blieb aber bei seiner Aussage, er habe das Mädchen nicht getötet. Wer konnte schlüssig beweisen, daß das Mädchen später nicht noch mit einem anderen Mann, dem wirklichen Mörder, in den Steinbruch zurückgekehrt war? Das Gericht brauchte konkretes Beweismaterial.

Das einzige Beweisstück, das die Polizei sichergestellt hatte, war eine dunkle Haarsträhne unter dem Fingernagel des Opfers. Allem Anschein nach hatte das Mädchen mit seinem Mörder gekämpft und ihm dabei die Haarsträhne entrissen. Ihr eigenes Haar war es jedenfalls nicht, denn sie war blond. Vollmer dagegen hatte dunkle Haare, doch die haben viele andere auch. Wie konnte man beweisen, ob das Haar von dem Verdächtigen stammte oder nicht?

Zum Glück für die Justiz hatte ein Gerichtswissenschaftler im kriminaltechnischen Labor in Ottawa eine Technik entwickelt, die es ermöglichte, auf der Grundlage von Spuren gewisser Metalle menschliches Haar zu klassifizieren. Der Körper sondert die betreffenden Metalle aus, und sie sammeln sich im Haar. Die einschlägigen Forschungen hatten ergeben, daß das Haar eines Individuums ebenso aussagekräftig sein kann wie sein Fingerabdruck. So wurde die sechs Zentimeter lange Strähne zusammen mit einer Probe vom Haar des Verdächtigen in die Hauptstadt (Ottawa) eingesandt. Eine Woche später lag die Antwort vor: Das Haar im Fingernagel des Opfers und die Haarprobe des Mordverdächtigen stammten von ein und derselben Person. Vollmer wurde für schuldig befunden.

Wenn die Dinosaurier einst durch einen Kometen umgebracht wurden – hinterließ dann nicht auch ein solcher «Haarstern» eine Strähne, die ihn verriet? Ich dachte an diese Möglichkeit, als ich mein Manuskript für *Nature* verfaßte.

Die Hauptbestandteile eines Kometen sind Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff und Kohlenstoff – und dies sind auch die wichtigsten Grundstoffe, aus denen die Erde besteht. Derartige Materialien, die überall vorkommen, sind kaum geeignet, die Identität eines Kometen zu verraten, wenn sie sich mit der sehr viel größeren Menge irdischer Materie vermischt haben. Gibt es aber vielleicht Metallspuren, die so charakteristisch für einen Kometenschweif sind, daß sie einen Kometen ebenso zu identifizieren vermochten wie Metallspuren im Haar einen Mörder? Ja – es gibt sie, und das war es, was Walter Alvarez und seine Mitarbeiter entdeckt hatten. Wenn ich jetzt zurückblicke, habe ich das ganz unbehagliche Gefühl, daß ich die Chance verpaßt habe, eine bedeutende Entdeckung zu machen, nur weil ich, jung und eingebildet wie ich war, namhaften Wissenschaftlern, von denen ich etwas hätte lernen können, nicht zugehört habe.

Als ich 1957 erstmals nach Zürich kam, hatte ich gerade meine Doktorarbeit beendet. Ich hielt es nicht für notwendig, mich noch einmal als Student immatrikulieren zu lassen, doch ging ich Tag für Tag zum Geologischen Institut, um in der Bibliothek zu lesen und ein paar Vorlesungen zu besuchen. Damals interessierte mich ganz besonders die Geochemie. Diese Wissenschaft war im letzten Jahrhundert entwickelt worden, um die chemische Zusammensetzung der Erde zu untersuchen. V. M. Goldschmidt leistete in den dreißiger Jahren auf diesem Gebiet bahnbrechende Arbeit und dehnte seine Untersuchungen auch auf die chemische Zusammensetzung extraterrestrischer Objekte aus. Ihm verdanken wir viel, was unsere Kenntnis von der Existenz chemischer Elemente im Kosmos anbelangt. So können wir beispielsweise zwischen Tektiten irdischen Ursprungs und anderen wie den Mikrotektiten aus dem Tunguska-Gebiet unterscheiden. Deren Zusammensetzung verrät, daß sie von einem anderen Himmelskörper aus dem Sonnensystem stammen. Allerdings wurde Goldschmidts Art der Geochemie in den Vereinigten Staaten nicht mehr gelehrt, als ich zu studieren begann. Wir kümmerten uns nicht mehr um die uns langweilig erscheinenden Daten der Elementenzusammensetzung, die Goldschmidt für verschiedene Himmelskörper ausgerechnet hatte. Wir waren nur an Vorgängen interessiert, an chemischen Reaktionen, die sich auf der Erde abspielten. Doch wie es im Leben so geht: Die Geochemievorlesung an der Universität Zürich hielt Fritz Laves, dessen «Hausheiliger» niemand anderes als V. M. Goldschmidt war. Laves erzählte gern Anekdoten aus seinen Jugendtagen in Göttingen, wo er seinen Lehrer vor den Pöbeleien nationalsozialistischer Rüpel in Sicherheit zu bringen hatte. Schließlich war Goldschmidt nach Großbritannien geflohen und kurz nach Kriegsende in Norwegen gestorben.

Laves bewahrte Goldschmidt stets ein ehrendes Gedenken. Goldschmidts *Geochemistry* war sein Lehrbuch. Zu Beginn der ersten Übungsstunde händigte man uns Verfielfältigungen einer Tabelle *Abundance of Elements* (*Die Abundanz der Elemente*) aus. Dieses Meisterwerk von Goldschmidt verglich das Vorkommen jedes Elements in der Lithosphäre (der aus Felsgestein bestehenden Erdkruste) mit der Häufigkeit des betreffenden Elementes in

Meteoriten. Anschließend begann Laves seinen Vortrag oder – genauer – seine Vorlesung. Der eintönige Fluß seiner Stimme wurde nur durch das Stakkato von Abkürzungen wie n.b. (für: nicht bestimmt) und p.p.m. (für: parts per million [Anteile pro Million]) unterbrochen. «Wasserstoff n.b.», so begann er. «Helium n.b.; Lithium 65 p.p.m. in der Lithosphäre, 4 p.p.m. in Meteoriten; Beryllium 6 p.p.m. in der Lithosphäre, 1 p.p.m. in Meteoriten; Kohlenstoff 320 p.p.m. in der Lithosphäre, 300 p.p.m. in Meteoriten; Stickstoff n.b.; Sauerstoff 466 000 p.p.m. in der Lithosphäre, 323 000 p.p.m. in Meteoriten...». Nach einer halben Stunde war Laves bei Lanthanum, Cerium und Proactinium gelandet. Ich war nie dafür bekannt, besonders geduldig zu sein, ja ich machte mir nicht einmal Gedanken über die einfachsten Formen der Höflichkeit, sondern verließ den Raum, noch bevor Laves mit seinem Proactinium fertig war. Wäre ich die ganze Stunde über im Hörsaal geblieben, hätte ich vielleicht etwas gelernt. Fraglos wäre Laves bis zum Ende der Liste gekommen und hätte uns vorgetragen: «Osmium n. b. in der Lithosphäre, 1,92 p.p.m. in Meteoriten; Iridium 0,001 p.p.m. in der Lithosphäre, 0,65 p.p.m. in Meteoriten; Gold 0,001 p.p.m. in der Lithosphäre, 0,7 p.p.m. in Meteoriten...». Und wenn ich an seiner zweiten Vorlesung teilgenommen hätte, hätte ich zweifellos gelernt, daß Osmium, Iridium, Platin und Gold samt und sonders zu einer Reihe von Elementen gehören, die man als Platinmetalle oder Siderophile (wörtlich: «Eisenliebende») bezeichnet. Sie kommen in der äußersten Gesteinsschale der Erde, der Lithosphäre, nur selten vor, finden sich jedoch in Meteoriten in sehr viel größeren Mengen.

Goldschmidt verbrachte seine letzten Jahre mit Arbeiten über die Häufigkeit des Vorkommens der Platinmetalle im Kosmos. Die natürlichen Konzentrationen dieser Metalle auf Erden sind äußerst gering. Mit den analytischen Methoden der ersten Nachkriegsjahre war es nahezu unmöglich, sie nachzuweisen. Dafür ist ihre durchschnittliche Konzentration im Meteoritengestein etwa tausendmal höher. Ja – in eisernen Meteoriten kommen diese siderophilen Edelmetalle noch reichlicher vor. Hier erreicht ihre Konzentration eine ganz andere Größenordnung.

Wie man allgemein annimmt, haben steinerne Meteoriten die gleiche Zusammensetzung wie unsere Erde in einem ganz frühen Stadium. Die gängige Theorie über die Entstehung unseres Erdballs besagt, daß unser Planet sich aus einer Vielzahl kleiner Materieklümpchen und Staubteilchen zusammenfügte, die sich gegenseitig durch ihre Schwerkraft anzogen. Radioaktive Elemente in diesem sich zusammenklumpfenden Material erzeugten Hitze, und zwar viel zu rasch, als daß sie sich in dem schnell wachsenden und sich rasch verfestigenden Planeten hätten verflüchtigen können. So kam es schließlich dazu, daß das steinige Material der Ur-Erde zu schmelzen begann. Geschmolzenes Eisen und Nickel – beide gehören zu den schwersten Elementen – sanken in der Schmelze nach unten, konzentrierten sich im Zentrum des Planeten und bildeten dessen Eisen-Nickel-Kern. Die siderophilen Platinmetalle haben eine chemische Affinität zum Eisen und sanken daher mit zum Erdkern ab. Die leichteren Silikat-Gesteinsschichten, denen

auf diese Weise ihre Beimengungen von Eisen, Nickel und siderophilen Metallen entzogen worden waren, bildeten rings um den Kern einen Mantel von etwa 2900 Kilometern Stärke. Auch dieser Mantel war noch immer heiß genug, so daß er eine leicht plastische Konsistenz besaß. Das starre, kalte Felsgestein darüber bezog sein Material aus dem Mantel und wurde so ebenfalls immer ärmer an Nickel, Eisen und siderophilen Metallen. Steinerner Meteoriten bestehen aus demselben Material wie die Erde, doch weil ihre Bestandteile nie chemisch voneinander getrennt wurden, haben sie noch ihre ursprünglichen, für den Kosmos typischen Anteile an siderophilen Metallen. Gleiches gilt für den kosmischen Staub – winzige Partikel, die entweder niemals Bestandteile größerer Körper waren oder aber irgendwann bei kosmischen Kollisionen von Himmelskörpern abgesprengt wurden. Kosmischer Staub regnet unaufhörlich auf die Erde herab, doch ist die Menge dieses kosmischen Fallouts im Vergleich zu der Hauptmasse terrestrischer Sedimente zu geringfügig, als daß sie deren typische chemische Zusammensetzung verändern könnte. Auch aus Sedimenten bestehendes Felsgestein hat demnach einen ungefähr ebenso geringen Anteil an siderophilen Metallen wie Felsen vulkanischen Ursprungs, deren Substanz aus dem Erdmantel stammt. Allerdings sollten die betreffenden Metalle in Tiefsee-Ablagerungen häufiger vorkommen. Beispielsweise werden gewisse geringfügige Mengen von Erosionsmaterial vom Festland bis in den zentralen Nordpazifik getragen, wo sie sich mit der sehr langsamen Rate von weniger als einem Millimeter pro Jahr als Ton ablagern. Kosmischer Fallout wird somit zu einer charakteristischen Komponente solcher ozeanischer Sedimente.

Goldschmidt hatte vorausgesagt, daß dies so sein müsse, war aber nicht imstande, diese Voraussage zu beweisen. Die primitiven Instrumente der unmittelbaren Nachkriegsjahre besaßen einfach nicht die Präzision, die erforderlich gewesen wäre, um so winzige Mengen zu messen. Goldschmidt war ein hervorragender Wissenschaftler, doch seine zeitweise durch politische Verfolgung und Krieg unterbrochene Laufbahn fand ein jähes Ende durch seinen viel zu frühen Tod. Hätte er nur zehn Jahre länger gelebt, hätte er die Genugtuung gehabt, über Zahlen und Daten zu verfügen, die seine Vorhersagen voll und ganz bestätigten, denn nun erreichte man durch die Neutronenaktivierungsanalyse die nötige Genauigkeit durch eben jene Technik, mit deren Hilfe man ein genaues Profil der Metallspuren in jener Haarsträhne machen konnte, die im eingangs angesprochenen Mordfall Vollmer die ausschlaggebende Rolle spielte.

Mittels der Neutronenaktivierungsanalyse lassen sich Metallspuren auch dann noch nachweisen, wenn ihre Konzentration nur ein Trillionstel des Gewichtes einer Probe beträgt. Bei dem Vollmer-Prozeß wurde diese Methode zum ersten Male angewandt, seitdem ist sie zur Routine geworden.

Neutronen sind jene Partikel von Atomkernen, die den Isotopen ihr Zusatzgewicht verleihen. Anders als Protonen, die positiv geladen sind und einander abstoßen, haben die umeinander kreisenden «neutralen» Neutronen eine gewisse Chance, von einem Atomkern «eingefangen» zu werden,

sich mit diesem zu verbinden und ihn so zu einem Isotopkern zu machen. Bei einem konzentrierten Fluß von Neutronen ist die Chance noch größer, daß die Neutronen auf Atomkerne treffen und Isotope bilden. Neutronenbombardement ist ein natürlicher Vorgang, der während der gesamten Erdgeschichte andauerte, denn freie, nicht an Atomkerne gebundene Neutronen sind Bestandteil der kosmischen Strahlung, jener Energie und Teilchenströmung, die beständig von der Sonne ausgeht. Isotope sind das natürliche Produkt dieses Bombardements. Beispielsweise entstand Kohlenstoff 14 (^{14}C oder $\text{C}14$) durch das «Bombardement» von atmosphärischem Stickstoff mit kosmischen Strahlen. Und da jedes radioaktive Atom wieder spontan in Tochterprodukte zerfällt, wird beispielsweise aus dem Kohlenstoff 14 durch radioaktiven Zerfall wieder Stickstoff mit der Massenzahl (bzw. dem Atomgewicht) 14.

Die herkömmliche Methode der chemischen Analyse bestand darin, aus einer gegebenen Probe ein bestimmtes chemisches Element auszusondern, und die gesamte Substanz zu wiegen. Dazu benötigte man nicht nur umfangreiches Probenmaterial, sondern es war auch viel Arbeit erforderlich, um die chemische Trennung vorzunehmen. Bei der Neutronenaktivierungsanalyse umgeht man den schwierigen Prozeß der Trennung jedoch. Man «bombardiert» bzw. «beschießt» einfach eine Probe, die sehr klein sein kann, mit Neutronen. Zwischen den Neutronen und den Ausgangselementen wie Platin und Iridium innerhalb der Probe finden zahllose Kernreaktionen statt. Die entstehenden, unterschiedlichen radioaktiven Isotope zerfallen sofort wieder. Dabei sendet ein jedes Isotop nach einem charakteristischen Muster Partikel und Energie aus. Dieses Zerfallsmuster dient – von bestimmten Instrumenten (Szintillations- bzw. Halbleiterzählern) gemessen – als «Signatur», die es ermöglicht, das Isotop (und damit auch das Ausgangselement, aus dem es durch den Neutronenbeschuß gebildet wurde) zu identifizieren. Die Anzahl der Zerfalls-«Ereignisse» für jedes Isotop verrät, in welchem anteiligen Verhältnis jedes Ausgangselement in der Probe vorhanden ist. Somit verrät die Analyse dem Forscher, welche Elemente die Probe enthält, und wie groß der Anteil jedes enthaltenen Elementes ist.

Die erste Anwendung der Neutronenaktivierungsanalyse im geologischen Bereich, die 1968 veröffentlicht wurde, verwirklichte Goldschmidts Träume. Zwei Naturwissenschaftler vom Scripps-Institut bestimmten die Konzentration von Osmium und Iridium in Sedimenten des Pazifischen Ozeans, um deren Gehalt an Bestandteilen aus dem Kosmos zu ermitteln.

Als ich 1969 von meiner ersten Bohrexpedition zurückkam, die mich in den Südatlantik geführt hatte, wurde ich – es war noch kein Jahr vergangen, seit man die Neutronenaktivierungsanalyse erstmals angewandt hatte – von zwei Kernchemikern der Universität von Texas gefragt, ob wir auch eine Spurenelementanalyse unserer Bohrkerne wünschten. Damals kämpfte ich auf verlorenem Posten gegen eine Quantifizierung der Geologie. Der immer mehr zur «Geräte-Geologie», zur instrumentalen Analyse hin tendierende Forschungstrend hatte bereits Daten, Daten und immer mehr Daten produ-

ziert, doch mit nur wenigen davon wußte man etwas Rechtes anzufangen. Ich war irritiert. Erst später erkannte ich meinen Fehler, nicht zu begreifen, daß die neuen Daten früher oder später zu neuen Ebenen des Verständnisses führen mußten. Vielleicht hätte ich positiv auf das Angebot aus Texas reagiert, wenn ich seinerzeit aufmerksamer Fritz Laves zugehört hätte, als er die Liste der Häufigkeit des Vorkommens der Elemente im kosmischen Material vorlas. Doch so sehr ich mir auch den Kopf über die Kometen zerbrach, und obwohl wir an zwei Bohrstellen die Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär durchbrochen hatten, leuchtete mir nicht ein, daß die Spurenelementanalyse uns möglicherweise verraten konnte, ob sich in unseren kostbaren Sedimenten aus jenem Grenzbereich Trümmersparten befanden, die extraterrestrischen Ursprungs waren, also nicht von der Erde selbst stammten.

Raumfahrtexperten und Astronomen hatten Goldschmidts prophetische Vorhersage nicht vergessen. Als die neue analytische Methode zur Verfügung stand, begann die Suche nach Platinmetallen. Nach Berechnungen der Wissenschaftler vom Scripps-Institut müssen kosmische Trümmer sich mit einer Rate von $1,2 \text{ mal } 10^{-8} \text{ Gramm pro Quadratmeter und Jahr}$ angehäuft haben, so daß die Konzentrationen von Iridium und Osmium entstanden, die sich in nordpazifischen Sedimenten fanden. Das ist nicht sehr viel – nur etwa 120 Gramm pro Quadratkilometer im Jahr. Die nächste Stufe bestand darin, kosmischen Abfall aus anderen Proben ozeanischer Sedimente zu isolieren.

Die Proben, mit denen die Wissenschaftler arbeiteten, waren kleine, kugelförmige Objekte, deren Durchmesser nur Bruchteile eines Millimeters betrug, und die aus Sedimenten stammten, welche vor mehr als hundert Jahren während der Kreuzfahrt des Forschungsschiffes *Challenger* gesammelt worden waren. Einige von ihnen sind reich an Eisen, andere bestehen nur aus Stein. Die wichtigen Elemente Eisen, Nickel und Kobalt sind in diesen Kügelchen mit Anteilen vertreten, die denen in den Eisenmeteoriten gleichen. Ein Emigrant aus Indien, R. Ganapathy, der für ein Chemiewerk in New Jersey arbeitete, beschloß, den Metallspurengehalt zu überprüfen, indem er die Neutronenaktivierungsanalyse anwandte. Fünfzehn Elemente wurden analysiert, darunter die siderophilen Platinmetalle Iridium, Osmium, Ruthenium und Gold. Ganapathy fand, daß steinerne Kügelchen dieser Art im Ozean mit steinernen Meteoriten deckungsgleich sind, was die Zusammensetzung ihrer Elemente angeht, und er war aufgrund seiner Daten davon überzeugt, daß die winzigen Kügelchen aus dem Weltraum stammen mußten. Tatsächlich sahen diese Kügelchen den entsprechenden Objekten aus dem Tunguska-Gebiet sehr ähnlich, doch es handelte sich bei ihnen meist um kosmischen Staub aus weniger spektakulären Meteoriteneinschlägen.

Ich war gerade an diesem Punkt angelangt, als Alvarez über die Iridiumanomalie stolperte. Walter Alvarez ist der Sohn eines berühmten Physikers. Sein Vater, Luis Alvarez, hatte 1968 den Nobelpreis für seine Leistungen auf dem Gebiet der Kernphysik gewonnen. Wie Nick Shackleton wählte auch der

junge Alvarez einen anderen Beruf, um dem Schatten seines Vaters zu entgehen. Doch ebenso wie Nick Shackleton entging er ihm dennoch nicht. Allerdings war es nicht so, daß Walter Alvarez nun seinerseits Karriere als Physiker gemacht hätte. Vielmehr wandelte er im Gegenteil seinen Vater zum Geologen um. Nach seinem Studium in Princeton und nach Forschungsarbeiten, die er nach seiner Promotion in Italien durchgeführt hatte, erhielt Walter Alvarez seine erste Anstellung am *Lamont-Doherty Geological Observatory* unmittelbar vor den Toren von New York.

Das Observatorium war unter seinem ersten Direktor, Maurice Ewing, das geworden, was es ist. Unter ihm war es von einem Zwei-Mann-Team zu einer Institution angewachsen, die Anfang der siebziger Jahre mehrere hundert Naturwissenschaftler beschäftigte. Neil Opdyke hatte dort ein erstklassiges Labor eingerichtet, um den remanenten Magnetismus in ozeanischen Sedimenten zu untersuchen. Die Wissenschaftler von Lamont trugen viel dazu bei, daß die Magnetostratigraphie ihren festen Platz als wissenschaftliche Methode erhielt. In Opdykes Labor arbeitete ein junger Physiker, Bill Lowrie, der sich nicht mehr ausschließlich auf die heutigen Ozeane beschränkte, sondern sich auch mit alten Meeresablagerungen befaßte, die bei der Auffaltung der Gebirge in luftige Höhen gehoben worden waren. So war es nur folgerichtig, daß er die ozeanischen Sedimente aus dem Mesozoikum und Känozoikum untersuchte, die bei Gubbio im umbrischen Apennin offen im anstehenden Felsgestein freilagen. Alvarez hatte die dortigen Gesteinsformationen während der Arbeiten kennengelernt, die er nach seiner Promotion in Italien durchführte. Er half Lowrie, bei Gubbio das Projekt anzukurbeln, das schließlich den Nachweis erbrachte, daß der Grenzton, in dem Luterbacher und Frau Premoli-Silva Beweise für das Massensterben der *Foraminiferen* gefunden hatten, in die kurze Epoche von *Chron-C-29-R* fiel.

Als Nichtpaläontologe war Alvarez damals noch nicht an der Frage des Massensterbens am Ende der Kreidezeit interessiert. Viel mehr beschäftigte ihn die Frage, wie verlässlich die magnetographische Zeitskala war.

Die Folgerung, daß die *Chron-C-29-R*-Epoche weniger als eine halbe Million Jahre umspannte, ergab sich aus der Breite des betreffenden magnetischen Streifens auf dem Meeresgrund. Obwohl inzwischen nur noch wenige gegen die Theorie der Meeresboden-Ausbreitung Einwände erhoben, war doch noch immer umstritten, ob diese Ausbreitung in gleichmäßigem Tempo erfolgt war. Also überlegte Alvarez: Wenn es noch eine andere, unabhängige Methode gäbe, die Dauer von C-29-R zu überprüfen, wäre bewiesen, auf wie tragfähigem Grund die Annahme einer relativ kurzen Dauer dieser Periode wirklich stand. Als er sich noch über dieses Problem den Kopf zerbrach, stieß Alvarez auf einen Artikel, den Naturwissenschaftler des Scripps-Instituts verfaßt hatten, die anhand der Spurenelementanalyse Schätzwerte für die Sedimentationsrate des kosmischen Staubs in der Tiefsee bestimmten. Denn ihm war klar: Wenn man den Gehalt an kosmischen Trümmern im «Grenzton» bei Gubbio bestimmte, gelang es auch abzuschätzen, wie lange es gedauert hatte, bis diese Tonschicht sich angehäuft hatte.

Bill Lowrie war inzwischen am Geophysischen Institut unserer Universität in Zürich tätig, und Alvarez war von Lamont nach Berkeley übergewechselt, wo auch sein Vater arbeitete. Luis Alvarez, der Vater, war zwar von seinem Posten am Lawrence-Laboratorium in Berkeley aus Altersgründen zurückgetreten, er arbeitete jedoch noch immer wissenschaftlich. Bei einer Diskussion im Familienkreis kam das Problem zur Sprache, und Vater und Sohn beschlossen, sich zusammenzutun. Um mit Hilfe der Neutronenaktivierungsanalyse auch winzige Mengen von Platinmetallen nachweisen zu können, benötigt man Instrumente, die mit äußerster Präzision arbeiten, aber auch große Sachkenntnis und entsprechende Mitarbeiter. Das Laboratorium von Berkeley hatte dies alles zu bieten; seine Mitglieder Frank Asaro und Helen Michel, beide wegen ihres Könnens in der Durchführung derartiger Analysen in der Fachwelt sehr angesehen, schlossen sich dem Alvarez-Team an.

Die Mannschaft von Berkeley suchte für ihre ersten Untersuchungen aus allen siderophilen Metallen Iridium aus, weil sich dieses am leichtesten mit Hilfe der Neutronenaktivierungsanalyse nachweisen läßt. Iridium ist ein guter «Fänger» für langsame Neutronen, und sein Zerfallsmuster läßt sich leicht analysieren. Proben wurden aus den verschiedenen Sedimenten bei Gubbio entnommen, die sich während der C-29-R-Epoche angesammelt hatten, und zwar sowohl aus dem annähernd fossilienlosen Ton wie auch aus den an Fossilien reichen Sedimenten unter und über ihm. Man bereitete das Probenmaterial aus allen drei Sedimentablagerungen für die Analyse vor, indem man die kalziumhaltigen Skelette in Säure auflöste, so daß nur der nicht in Säure lösliche Ton zurückblieb. Dies geschah, um die Proben mit den ozeanischen Tönen vergleichbar zu machen, welche die Scripps-Mitarbeiter analysiert hatten.

Die auf diese Weise präparierten Proben aus Gubbio wurden in Berkeley in einen Reaktor für Neutronenaktivierung eingegeben, und man stellte fest: Die Iridiumkonzentration der nicht in Säure löslichen Tonsedimente über und unter dem Grenzton von Gubbio lag bei 0,3 Anteile pro Milliarde. Dies entsprach genau der Vorhersage der Scripps-Mitarbeiter für die Anhäufung kosmischen Iridiums in Tiefseesedimenten.

Damit hatte man die Bestätigung, daß die Magnetostratigraphen tatsächlich verlässliche Schätzungen über die Dauer geologischer Epochen angestellt hatten. *Chron C-29-R* muß etwa eine halbe Million Jahre lang gedauert haben, wie Denis Kent aus der Breite des magnetisierten Streifens auf dem Meeresgrunde erschlossen hatte.

Doch wie stand es um den «Grenzton» selbst, jenen einen Zentimeter dicken Sedimentstreifen, der so wenig Lebensspuren aufwies? Alvarez war verblüfft, hier eine völlig abnorme Konzentration von Iridium vorzufinden. Das Maximum lag bei nahezu 10 Anteilen pro Milliarde in einem Horizont, der nur wenige Millimeter oberhalb der Basis dieser Tonschicht lag. Die Abweichung betrug das Dreißigfache der Norm. Danach ging die Iridiumkonzentration wieder auf das normale Maß der sogenannten kosmischen

«Hintergrundstrahlung» zurück – dies in einem einen Meter über dem «Grenzton» gelegenen Sediment, das die Zeit etwa fünfzehntausend Jahre nach dem Ende des Mesozoikums repräsentiert.

Die Entdeckung dieser auffälligen Anomalie an einer bestimmten Stätte weckte die Neugier der Alvarez-Gruppe. Sie analysierte infolgedessen Proben, welche von der in der Fachwelt berühmten Fundstätte Stevn's Klint in Dänemark stammten, wo dem «Grenzton» von Gubbio der «Fischton» entspricht. Und in Stevn's Klint gab es eine sogar noch auffälligere Iridiumanomalie! Die von der kosmischen Hintergrundstrahlung herrührende Sedimentation lag – ebenso wie bei Gubbio – bei 0,3 Anteilen pro Milliarde. Das Maximum innerhalb des Fischtons stieg jedoch auf 65 Anteile pro Milliarde an. Dies entspricht dem Zweihundertfachen der normalen Konzentration. Siebzig Zentimeter über der Grenze fällt der Iridiumgehalt auf 0,4 Anteile pro Milliarde zurück, und einen Meter darüber liegt er wieder bei der «Hintergrunds»-Norm.

Die nächstliegende Erklärung für die so hohe Konzentration von Iridium ist, daß an beiden Stätten das Grenzbereich-Sediment ungewöhnlich langsam abgelagert wurde. Wenn die Ablagerung dieses Grenzbereich-Sediments an beiden Orten nicht in 5000, sondern in einer Million Jahren stattfand, dann konnte sich genug kosmischer Staub aufhäufen, um die zweihundertfache Menge der normalen Iridiumkonzentration zu erklären. Wenn dies aber der Fall war, hätte auch die Konzentration anderer Spurenelemente ungefähr um den Faktor 200 erhöht sein müssen.

Deshalb analysierte das Alvarez-Team in Gubbio außer Iridium auch Proben von 27 anderen Elementen, darunter Natrium, Aluminium, seltene Erden und nichtsiderophile Spurenelemente. Doch während im «Grenzton» von Gubbio Iridium einen um den Faktor 30 erhöhten Anteil aufwies, war der Anteil keines der anderen Elemente gegenüber ihrer normalen Konzentration auch nur verdoppelt. Ja – im Vergleich zu den tiefer- und höhergelegenen Schichten waren die seltenen Erden im Grenzton von Gubbio sogar außergewöhnlich schwach vertreten. Dies macht die Häufung des Iridiums noch ungewöhnlicher. Die Magnetostratigraphie hatte gestimmt: Eine außergewöhnlich langsame Sedimentationsrate des «Grenztons» konnte die Anomalie nicht erklären. Vielmehr muß es eine außergewöhnlich hohe Zufuhr von iridiumreichen kosmischen Abfall gegeben haben.

Die einzige bekannte Herkunftsquelle von Abfall, der außergewöhnlich reich an Platinmetallen ist, ist extraterrestrisch, liegt also außerhalb unserer Erde. Mithin erbrachten Luis Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro und Helen Michel in jenem aufregenden Jahr 1979 den ersten stichhaltigen Beweis dafür, daß am Ende der Kreidezeit die Erde von einem Ereignis getroffen wurde, das durch extraterrestrische, «nichtirdische» Gewalten ausgelöst worden war.

Um diese Hypothese zu überprüfen, führte Frank Asaro einen weiteren Test durch. Wenn das Iridium extraterrestrischen Ursprungs war, mußten auch andere siderophile Metalle in den Sedimenten des Grenzbereichs an-

teilmäßig reicher vorhanden sein. Also analysierten er und Helen Michel die Konzentrationen von Osmium, Platin, Gold, Nickel und Kobalt aus dem dänischen «Fischton». Die Anteile dieser Metalle in Stein-Meteoriten, und zwar im Vergleich mit Iridium, hatte bereits Urs Krähenbühl in Bern untersucht. Asaro fand in seinen Proben aus dem «Fischton» eine erstaunliche Parallele.

Ganapathy, der die «Kügelchen» aus der Tiefsee als geschmolzenen kosmischen Staub identifiziert hatte, erfuhr durch die Presse, das Team von Berkeley habe eine Iridiumanomalie entdeckt. Daraufhin führte er Analysen von neun Edelmetallen durch, darunter Palladium, Ruthenium und Rhenium, dies zusätzlich zu den Metallen aus dem dänischen Grenzton, die Asaro analysiert hatte. Auch er entdeckte: Alle anderen Befunde waren gleichfalls mit höheren Anteilen vertreten und alle, mit Ausnahme von Rhenium, hatten eine Abundanz-Rate, die der in den Meteoriten sehr ähnlich war.

Rhenium war anteilmäßig noch höher vertreten. Ganapathy beobachtete, daß dieses Element sehr leicht löslich ist. Sein außergewöhnlich hoher Anteil kann daher von chemischen Prozessen im Meerwasser herrühren. Doch wenn die Anhäufung von Rhenium das Ergebnis chemischer Prozesse im Ozean sein konnte – hätten dann nicht auch andere Metalle im «Grenzton» in ähnlich hohen Konzentrationen vorkommen müssen? Der Ton in Dänemark enthält wenig kohlen-saures Kalzium (Kalziumkarbonat), das den Hauptbestandteil des Kalkgesteins bildet, und er ist von schwärzlicher Farbe. Derartige Unterschiede lassen vermuten, daß damals, als der «Grenzton» abgelagert wurde, in den Ozeanen ungewöhnliche chemische Bedingungen herrschten. Wenn die Chemie der Ozeane die reiche Konzentration von Iridium und anderen seltenen Metallen erklärte, so dürfte diese Anomalie nicht bei Sedimenten vorkommen, die an Land abgelagert wurden. Waren aber die Platinanteile tatsächlich «kosmischer Müll», mußte diese Iridiumanomalie durchweg in sämtlichen Sedimenten der Grenzzone zwischen Kreidezeit und Tertiär nachweisbar sein, gleichgültig, ob die betreffenden Sedimente auf dem Meeresboden oder auf den Kontinenten abgelagert worden waren.

Luis und Walter Alvarez erhielten von ihren Kollegen im paläontologischen Institut in Berkeley Proben von Sedimenten, die auf alten Überschwemmungsebenen in Montana abgelagert worden waren. Die Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär wurde bei diesen Proben durch das Aussterben der Dinosaurier und die Auszählung fossiler Pollen markiert – mit anderen Worten: Die letzten Dinosaurier-Überreste lagen unter der Schicht, aus der die Proben stammten. Im Gegensatz zu den Dinosauriern, von denen nur dann Fossilien übrigblieben, wenn sie ihr Leben unter ganz speziellen Bedingungen beendet hatten, die die Erhaltung ihrer Überreste begünstigten, findet man fossile Pflanzenpollen nahezu überall. Jahr für Jahr produzieren Pflanzen ungeheure Pollenmengen. Manche Pollenkörnchen sind in Sedimente eingeschlossen, die sich in den Böden von Seen, auf Überflutungsebenen oder in Sümpfen angesammelt haben, um schließlich Mikrofossilien im Felsgestein zu werden.

Eine Gruppe parasitärer Pflanzen und ihrer Verwandten, die bei Paläobotanikern unter der Bezeichnung *Aquilapolleniten*-Flora läuft, starb etwa zur gleichen Zeit wie die Dinosaurier. Der Aussterbenshorizont dieser Flora, der durch die Auszählung fossiler Pollen definiert ist, bildet dort die Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär, wo fossile Tierüberreste selten sind oder ganz fehlen.

Im Frühjahr 1980 hörten wir gerüchteweise, daß auch in der Grenzsequenz der alten Flutebene von Montana eine Iridiumanomalie entdeckt worden war. Die erregende Neuigkeit hätte eigentlich alle die Skeptiker zum Schweigen bringen müssen, die von einer außergewöhnlichen Meerwasserchemie ausgegangen waren. Bei einem Workshop in Ottawa, den Dale Russell einberufen hatte, um die Frage des Grenzbereichs zu diskutieren, platzte ich gegenüber Asaro mit der Frage heraus: «Und wo kommt in der Sektion Montana die Iridiumanomalie vor?»

«Auf dem Platin-Verlobungsring der Dame, die die Proben zur Untersuchung vorbereitete», erwiderte Asaro.

Tatsächlich hatte die erst kurz zuvor eingestellte Technikerin, welche die Proben in Aluminiumfolie eingewickelt hatte, vor nicht allzu langer Zeit geheiratet. Die Berührung des Testmaterials mit ihrer Hand, an der sie neue Ringe aus Platin trug, reichte aus, sämtliche Proben mit den drei siderophilen Metallen zu versetzen, die diese Ringe enthielten: Platin, Gold und Iridium. Die Wissenschaftler aus Berkeley konnten ihre Originalproben wegwerfen und nach neuem Material suchen.

Schließlich fand das Team eine Iridiumspitze an der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär in Montana, doch die Verzögerung durch den Zwischenfall mit dem Ring führte dazu, daß eine Gruppe von Gelehrten aus Los Alamos erstmals eine Iridiumanomalie in rein kontinentalen Sedimenten entdeckte, und zwar im Ratonbecken.

Das Ratonbecken ist ein kleines, sedimentäres Becken östlich der Sangre-de-Cristo-Berge in Colorado und New Mexico. Das Klima dort ist heute sehr trocken. Autofahrer beeilen sich, durch diese unwirtliche, halb wüstenartige Landschaft hindurchzukommen, die man durchqueren muß, wenn man von Texas nach Denver will, oder von Denver nach Süden reist. Doch vor 60–70 Millionen Jahren war diese Region warm, feucht, sumpfig und von dichtem Wald überwuchert wie heute das Amazonasbecken. Gelegentlich legten sich nach Überschwemmungen Sand und Schlamm über die üppige Vegetation. Die Bäume starben ab und wurden im Lauf der Zeiten zu Kohle.

Das Interesse der Neuzeit an Kohle hat erheblich dazu beigetragen, die Urgeschichte dieses Gebietes aufzudecken. Um wirtschaftlich lohnende Kohlevorkommen zu lokalisieren, hatte man dort, wo man Straßenzüge baute, die Sedimentschichten untersucht. Man hatte Bohrlöcher in das Becken getrieben, und um die Schichten paläontologisch datieren zu können, hatte man sich intensiv mit den Fossilien befaßt, die in diesen Schichten enthalten waren. In der Gegend von San Juan, nach Westen hin, waren reichlich Dinosaurierfossilien zu finden. Man hatte hier zahlreiche Knochen entdeckt, doch

schienen diese Tiere nicht in den kreidezeitlichen Wäldern des Ratonbeckens selbst gelebt zu haben. Den Grenzbereich in der Raton-Sequenz markierte daher das Aussterben der *Aquilapolleniten*-Flora. Man sammelte Proben aus Bohrkernen und an Straßenbaustellen. Analysiert wurden sie von Carl Orth und seinen Mitarbeitern im Laboratorium von Los Alamos, und zwar mit der raffiniertesten Neutronenaktivierungsanalyse, die noch die Entdeckung von Trillionstel Anteilen ermöglichte. Orth fand die Anomalie exakt an dem vorhergesagten Horizont in einem weißlichen Grenzton nahe dem obersten Horizont eines schlammigen Sediments unter einer Kohleschicht. Die maximale Iridiumkonzentration von fünf Anteilen pro Milliarde betrug das Zweihundertfünzigfache der normalen Konzentration. Nach dieser Entdeckung konnten Zweifler nicht länger einwenden, daß sich das überzählige Iridium in dem Grenzton aus ozeanischen Sedimenten aufgrund irgendwelcher chemischer Prozesse abgelagert hatte.

Die Entdeckung einer Iridiumanomalie an der paläobotanisch markierten Grenze zwischen Kreide und Tertiär sprach sehr dafür, daß die *Aquilapolleniten*-Flora an Land etwa zur gleichen Zeit ausstarb wie die schwimmenden Organismen in den Ozeanen. Somit erwies sich die Iridiumanomalie als ein sehr präziser «Ereignis»-Indikator.

Doch abermals war ein Differentialtest mit der Magnetostratigraphie unumgänglich. Wenn das Iridium an Land und im Meer aus demselben kosmischen Fallout stammte, dann mußte die Schicht, die diese abnorme Konzentration enthielt, während der magnetostratigraphischen Epoche *Chron C-29-R* entstanden sein. Wenn die Iridiumanomalie aber in einem positiv magnetisierten Sediment gefunden werden sollte, wäre damit jedoch gleichzeitig die These, daß der Zusammenstoß mit einem außerirdischen Objekt das Iridium überall verstreut habe, massiv gefährdet – und dies schien eine gewisse Zeit lang tatsächlich der Fall zu sein.

Im Jahre 1982 untersuchte ein Wissenschaftler einer Ölgesellschaft aus Houston, Texas, eine Abfolge von Bohrkernen aus dem Ratonbecken. Dabei fand er heraus, daß der iridiumreiche Horizont in einer Zone normal polarisierter Sedimente lag, nicht in eine Epoche magnetischer Umkehrung fiel. Allerdings übersah er die Tatsache, daß unter gewissen Umständen Felsgestein noch ein zweites Mal magnetisch beeinflusst werden kann, und zwar auch noch lange nach der Zeit, in der die Sedimente abgelagert wurden. In einem solchen Fall ist es erforderlich, mit Hilfe einer sogenannten «magnetischen Reinigung» die Spuren der späteren Beeinflussung zu tilgen und die ursprüngliche magnetische Prägung wieder sichtbar zu machen. Als Gene Shoemaker und seine Kollegen vom Geologischen Forschungsdienst der USA ihrerseits dieselbe Schichtenfolge im Ratonbecken untersuchten, kamen ihre «gereinigten» Signale laut und deutlich: Sämtliche Sedimente im Bereich der Grenze hatten remanenten Magnetismus mit umgekehrter magnetischer Polarität.

Mittlerweile setzte das Team aus Berkeley, entmutigt, wenn nicht entsetzt wegen des Fiaskos mit dem Platinring, seine Suche nach der Iridium-

anomalie in Sedimentschichten des heutigen Staates Montana fort. An einer neuen Reihe von Proben wurden magnetostratigraphische Messungen und Neutronenaktivierungsanalysen durchgeführt; die Resultate stimmten voll mit denen von Orth und Shoemaker überein. Eine Iridiumspitze fand man in einem «Grenzton» unter einer Kohleschicht. Die maximale Iridiumanreicherung von vier Teilen auf eine Milliarde ähnelte sehr den entsprechenden Daten aus dem Ratonbecken und gehörte zu einer Epoche reverser Polarität. Drei Meter unter dem iridiumreichen Grenzton lagen die Überreste des letzten Dinosauriers im dortigen Gebiet – ein Oberschenkelknochen eines *Tyrannosaurus rex*, der nicht mehr als 30 000 Jahre vor dem Iridium-Fallout gelebt haben kann.

Das von Shoemaker untersuchte Probensegment war nicht lang. Er konnte zu wenig von dem «Strichcode» entschlüsseln, um mit Gewißheit sagen zu können, ob die umgekehrt polarisierten Grenzsedimente im Ratonbecken zu C-29-R oder zu einer anderen umgekehrt polarisierten Epoche gehört hatten. Dasselbe galt für die Proben, die das Team von Berkeley untersucht hatte, desgleichen für Proben von drei weiteren Stellen in Montana, die samt und sonders umgekehrt polarisiert waren. Doch weiter im Norden, in der kanadischen Provinz Alberta, stellten kanadische Wissenschaftler einwandfrei fest: Das Sterben der Dinosaurier fand in der Epoche C-29-R statt. Die Grenze bildete dort eine Schicht vulkanischer Asche, die sich mit der Kalium-Argon-Methode datieren ließ. Die Asche war umgekehrt polarisiert, und die radiometrische Datierung wies ihre Ablagerung in die Zeit vor etwa 65 Millionen Jahren – mit anderen Worten: in die Epoche *Chron C-29-R*.

Doch noch immer gab und gibt es bis heute Zweifler, wie es sie einfach geben muß, wenn eine so buchstäblich welterschütternde These wie die Theorie vom Zusammenstoß der Erde mit einem extraterrestrischen Körper geäußert wird, um ein so umstrittenes Ereignis wie das Massensterben der Kreidezeit zu erklären. Während der unmittelbaren Folgezeit – Anfang der achtziger Jahre – führte man jeden Test durch, den Forscher sich nur ausdenken konnten, um die These, daß die Iridiumanomalie kosmischen Ursprungs war, entweder zu beweisen oder zu widerlegen. Der unaufhaltsame Fortschritt der naturwissenschaftlichen Techniken hatte 1980 die Möglichkeit eröffnet, mit Hilfe eines ultrasensitiven Detektors, des sogenannten Akzelerator-Massenspektrometers, einzelne Atome zu zählen. Mit dieser Methode fand man ganz leicht das im dänischen «Grenzton» angereicherte Iridium. Allerdings war das Gerät dermaßen sensibel, daß es auch in dem Sediment ein gutes Stück über dem «Grenzton» angereichertes Platin registrierte, was wiederum den Gedanken nahelegte, daß der kosmische Fallout, nachdem er sich abgelagert hatte, vielleicht tatsächlich mit dem Seewasser reagierte. Aufgelöstes Platin scheint sich noch lange Zeit im Meerwasser gehalten zu haben, bevor es sich – Jahrhunderte nach dem extraterrestrischen Ereignis, von dem es herrührte – endgültig abgelagerte, obwohl das überschüssige Iridium normalerweise auf den «Grenzton» beschränkt blieb.

Die Tatsache, daß vielleicht zumindest Platin chemisch ausgefällt wurde, ließ Skeptiker noch einmal die Möglichkeit in Betracht ziehen, daß abnorme Konzentrationen derartiger Metalle mit ganz gewöhnlicher Chemie erklärbar sein könnten.

Karl Turekian von der Yale-Universität, ein Spezialist für maritime Geochemie, äußerte eines Tages während der Konferenz in Snowbird, Utah, die Vermutung, daß vielleicht die Analyse der Isotopenzusammensetzung des Osmiums im «Grenzton» ein für allemal die Frage nach einem kosmischen oder terrestrischen Ursprung dieser Elementkonzentrationen klären könnte.

Osmium hat zwei stabile Isotope, Osmium 186 und Osmium 187. Osmium 187 ist ein Zerfallsprodukt von Rhenium 187. Und weil das radioaktive Rhenium durch Verstrahlung zerfällt und dabei Osmium 187 produziert, bestehen an Rhenium reiche Materialien eigentlich mehr aus Osmium 187 als aus Osmium 186. Es gibt mehr Rhenium in der Lithosphäre als in den Meteoriten, so daß Osmium 187 viel häufiger in terrestrischen Sedimenten vorhanden ist als im kosmischen Fallout. Nach Turekians Schätzungen betrug das anteilige Verhältnis Osmium 187 zu Osmium 186 im kontinentalen Felsgestein etwa 10, in Meteoriten dagegen nur ungefähr 1.

Turekian ist ein Tatmensch, und er kannte auch das für seine Aufgabe erforderliche Gerät: Die *MIT-Brown-Harvard-Consortium-Cameca-IMS-3f*-Ionen-sonde. Bei diesen Instrumenten handelt es sich um eine spezielle Art von Massenspektrometern, deren Vorteil – wie beim Beschleunigungs-Massenspektrometer – in ihrer Fähigkeit besteht, die Isotopenzusammensetzung von Elementen in sehr, sehr kleinen Konzentrationen nachzuweisen. Sie sind wahre Wunder der neuzeitlichen Analysetechnik. Zusammen mit einem begeisterungsfähigen jungen Mitarbeiter analysierte Turekian die Osmiumisotope in den «Grenztonen» aus Dänemark sowie dem Ratonbecken und verglich die Isotopenzusammensetzung mit der normaler Bohrkernproben vom Boden der Ozeane.

Wie sich dabei herausstellte, rangierte das Osmium-Isotopenverhältnis in normalen ozeanischen Sedimenten zwischen den Werten 6 und 8,5. Der Wert beträgt nicht ganz 10, wie Turekian es für rein irdische Erosionsprodukte vorausgesagt hatte, weil alle Tiefseesedimente bedeutende Anteile von Staub und Trümmern aus dem Kosmos enthalten. Doch die Osmium-Isotopenanalyse der «Grenztone» erbrachte dramatisch veränderte Werte. Die Proben aus dem Ratonbecken enthalten einen Osmiumanteil von etwa 1,29, die aus Dänemark von 1,65. Abermals ist die Abweichung von dem vorhergesagten Wert 1 für Meteoriten auf Verunreinigung und Vermischung des Materials zurückzuführen, da sich die aus dem Kosmos stammenden Substanzen mit irdischen Sedimenten vermischten.

Turekian hatte seine Forschungen als Skeptiker begonnen. Doch schließlich belehrten ihn seine eigenen Daten eines besseren; seitdem haben weitere Untersuchungen – Analysen von Isotopen, Analysen der Anreicherung oder Ausdünnung zahlreicher Elemente neben den siderophilen – die

meisten Zweifler davon überzeugt, daß die Besonderheiten der Sedimente des Grenzbereichs zwischen Kreide und Tertiär in der Tat von einer abnormen Zufuhr extraterrestrischer Trümmer am Ende der Kreidezeit zeugen. Die nächste Frage betraf die Beschaffenheit der außerirdischen Quelle dieser Trümmer: Stammte dieses Übermaß siderophiler Metalle von einem Asteroiden oder Kometen, oder waren diese Trümmer das Ergebnis einer relativ erdnahen Supernova-Explosion?

Eine Supernova als Auslöser der Katastrophe hatte zuletzt der Tübinger Paläontologe Otto Schindewolf 1954 in Betracht gezogen. Eine Supernova, ein explodierender Stern, kann so viel Energie ausstrahlen wie 10 Milliarden Sonnen oder 10^{52} ergs. Dies entspricht einer Milliarde Trillionen (10^{21}) Mal mehr Energie, als der Einschlag eines Kometen von der Größenordnung des Halleyschen freisetzen würde. Nur ein sehr kleiner Bruchteil dieser Energie würde dabei als Explosionsblitz verstrahlen, und nur abermals ein noch viel kleinerer Bruchteil davon würde die Erde erreichen. Doch unsere Umwelt wäre dennoch in Mitleidenschaft gezogen, selbst wenn die Explosion in einer Entfernung von 100 Lichtjahren stattfände. Wäre die Erde aber nur die Hälfte dieser Distanz von der Supernova entfernt, würde die Strahlung dieser Explosion hohe Verluste unter den Lebewesen auf der Erde hervorrufen.

Schätzungen zufolge explodiert alle 70 Millionen Jahre eine Supernova in einer Entfernung von nur etwa 50 Lichtjahren von der Erde. Als daher Vater und Sohn Alvarez ihre ersten Hinweise auf eine aus dem Kosmos stammende Anreicherung mit Iridium entdeckt hatten, waren sie überzeugt, Trümmer gefunden zu haben, die von einer solchen – von ihnen nur vermuteten – Explosion stammten. Und im Nu schrieb und sprach alle Welt von dem Massensterben urzeitlicher Lebewesen durch eine Supernova-Explosion.

Die ursprüngliche Auffassung des Alvarez-Gespanns beruhte auf einem Test, den einer ihrer Freunde beim Scripps-Institut vorgeschlagen hatte. Iridium hat zwei Isotope mit den Atomgewichten (den Massenzahlen) 101 und 102. Unterschiedliche Supernovae produzieren Iridium mit ganz verschiedenen Isotopenzusammensetzungen. Unser gesamtes Sonnensystem, so behaupten Astronomen, entstand aus Trümmern, die sich im Laufe der Zeit nach vielen Supernova-Explosionen angehäuft hatten. Weil unsere Sonne und deren Planeten sich aus diesen Trümmern zusammengeballt und verdichtet (kondensiert) haben, muß das Isotopenverhältnis des Iridiums überall im Sonnensystem, ob auf der Erde oder in einem Meteor einen Durchschnitt der verschiedensten Supernovae bilden. Dieses Verhältnis war wohl bekannt. Wenn frischer kosmischer Abfall von einer Supernova-Explosion eine gewisse Zeit nach der Explosion auf die Erdoberfläche fällt, sollte die Schicht dieser kosmischen Trümmer, die sich dann bildet, ihr besonderes Kennzeichen haben, und zwar in Form eines Isotopenverhältnisses, das sich von dem in unserem Sonnensystem üblichen Durchschnitt unterscheidet. Frank Asaro und Helen Michel vom Berkeley-Team unternahmen es, das

Isotopenverhältnis des Iridiums aus dem «Grenzton» mit dem des «gewöhnlichen» Iridiums in anderen Schichten zu vergleichen. Sie bedienten sich dabei der bereits beschriebenen Neutronenaktivierungsanalyse.

Ihre erste Messung gab ihnen Anlaß zu der Annahme, der Ursprung des Iridiums müsse eine Supernova gewesen sein, denn für die Proben aus dem «Grenzton» ergab sich ein Iridium-Isotopenverhältnis, das um 5 % von dem in unserem Sonnensystem gemessenen Wert abwich. Ihre zweite Messung ergab jedoch eine Abweichung um 5 % in die entgegengesetzte Richtung. Sie fürchteten, bei der ersten Analyse Fehler begangen zu haben, und auch vom Standpunkt der Wahrscheinlichkeit aus erschien die Annahme einer erdnahen Supernova Luis Alvarez immer ungeeigneter, die Probleme der «Grenzzone» zu lösen. In den Proben aus Gubbio war die Iridiumkonzentration so hoch, daß die Entfernung zu dem angenommenen explodierenden Stern nur etwa ein Zehntel eines Lichtjahres betragen haben dürfte – kaum mehr als die Entfernung, die das Licht in einem Monat zurücklegt. Doch die Chance, daß sich während der letzten 100 Millionen Jahre eine solche Explosion derart nahe bei unserem Sonnensystem ereignete, steht eins zu einer Milliarde. Ein solches Ereignis ist mit anderen Worten einmal in jeweils einer Million Milliarden Jahre zu erwarten. Angesichts solcher Zahlen nehmen sich die 4,5 Milliarden Jahre unserer Erdgeschichte recht bescheiden aus. Ende 1979 war die Gruppe aus Berkeley davon überzeugt, daß sie sich durch Fehler beim Experimentieren in die Irre führen lassen hatte. Bei weiteren Untersuchungen stellte es sich heraus: Das Isotopenverhältnis des Iridiums in den «Grenztonen» war annähernd dasselbe wie auch sonst im Sonnensystem.

Nur um sicherzugehen, wurde der Neutronendetektiv abermals an den Schauplatz des Verbrechens gerufen. Der astrophysikalischen Theorie zufolge muß bei den schwereren Elementen, die bei Supernova-Explosionen durch das Einfangen von Neutronen entstehen, ein Plutonium-244-Atom auf je eintausend Iridiumatome kommen. Plutonium 244 ist radioaktiv, doch mit einer Halbwertszeit von 80,5 Millionen Jahren zerfällt es nicht sehr rasch. Wenn vor 65 Millionen Jahren die kosmischen Trümmer einer Supernova-Explosion auf die Erde gefallen waren, müßte eigentlich noch mehr als die Hälfte Plutonium 244 vorhanden sein, und die Neutronenaktivierungsanalyse hätte mit Leichtigkeit dessen Existenz nachweisen können. Doch von Plutonium 244 fand man keine Spur. Also entfiel der Verdacht, daß ein explodierender Stern der Täter sei. Nur noch Asteroiden oder Kometen konnten die Schurken gewesen sein, welche die Katastrophe am Ende der Kreidezeit hervorriefen.

Vater und Sohn Alvarez sprachen sich für einen Asteroiden als Täter aus, und sie meinten damit ein Apollo-Objekt. Zwar hatte Wetherill die These aufgestellt, daß diese Objekte, deren Bahn sich mit der Erdbahn kreuzt, Kometen ohne gasartige Substanzen seien. Andere aber hielten es für wahrscheinlicher, daß es sich um Asteroiden handelte, die durch die Schwerkraft eines ihnen zu nahe gekommenen Sterns aus ihrer Bahn geworfen worden waren. Was auch immer sie waren oder sind: Apollo-Objekte bestehen aus

massivem Gestein, Kometen dagegen hauptsächlich aus Eis. Eventuell gab es in bezug auf ihre Chemie zwischen Kometen und Asteroiden Unterschiede, besonders, wenn Clube und Napier mit ihrer Auffassung recht hatten, daß Kometen von außerhalb unseres Sonnensystems eingefangen wurden. Ob es wohl möglich war, Neutronen als Detektive einzusetzen, um herauszufinden, welcher von beiden Kategorien (Asteroiden oder Kometen) der wahre Täter angehörte, der vor 65 Millionen Jahren zuschlug? D. E. Brownlee und andere sammelten aus der Atmosphäre 5–50 Mikrometer umfassende Staubpartikel von zerfallenen Kometen. Ihre Zusammensetzung entsprach der jedes beliebigen steinernen Meteoriten (und – entsprechend – Asteroiden). Die von Jan Halliday durchgeführte Spektralanalyse der Kometenfragmente erbrachte dasselbe Resultat. Neutronen hatten die gesamte Detektivarbeit geleistet.

Wenn aber unsere leistungsfähigsten kriminalistischen Hilfsmittel nicht zwischen Kometen und Asteroiden zu unterscheiden vermögen, können wir vielleicht zu primitiveren Methoden zurückkehren. Schließlich besteht ja die Möglichkeit, daß es einen Krater gibt, in dem noch die Überreste eines solchen Schurken zu finden sind. Für eine ganze Reihe von Wissenschaftlern ist die Tatsache von Bedeutung, daß einige Krater in Nordsibirien und Südrußland ungefähr 65 Millionen Jahre alt sind. Keiner von ihnen ist allerdings sehr groß. Einer – bei Kamensk in der Ukraine – mißt nur 25 Kilometer im Durchmesser, von dem größten von ihnen, dem Krater von Kara in Sibirien, kann man das Alter nicht genau bestimmen. Ein Meteorit von einer Trillion Tonnen Durchmesser dürfte einen Krater von 200–300 Kilometern Durchmesser in den Boden sprengen. Dennoch sollte man nicht ausschließen, daß die Krater in Rußland von einem Einschlag am Ende der Kreidezeit herrühren. Man sollte ferner nach Erklärungen suchen, warum es sich um mehrere kleine und nicht um einen einzigen, riesigen Krater handelt. Andererseits könnte das Himmelsobjekt, das auf die Erde prallte, auch in den Ozean gestürzt sein. Chris Hartnady aus Südafrika schrieb mir 1985, er habe einen 300 Kilometer breiten Krater des richtigen Alters im Indischen Ozean südwestlich der Seychellen entdeckt. Vorläufige Untersuchungen der ozeanographischen Daten bekräftigten seine Auffassung. Inzwischen erwägt man die Durchführung einer Tiefsee-Bohrexpedition, um festzustellen, ob dieser Krater das nasse Grab des seinerzeit auf die Erde gefallenen Meteoriten ist.

Finsternis am hellichten Tage

Ein populärer Science-Fiction-Autor bediente sich der Methoden, die ein Gericht bei einem Mordprozeß anwendet, als er über das Massensterben am Ende der Kreidezeit schrieb. Wie bei einem Verhör fragte er nach dem «Warum», dem «Wer» und dem «Wie».

Die Frage «Warum?» bezieht sich auf das Tatmotiv – oder auch auf dessen Fehlen. Im Gegensatz zu Darwins Vermutungen haben wir so gut wie keine Beweise dafür, daß die Dinosaurier ausstarben, weil sie im Existenzkampf unterlagen. Sie hatten keine Rivalen, die imstande gewesen wären, sie auszurotten, um ihren «Platz an der Sonne» einzunehmen. Wenn es überhaupt jemanden gab, der sie tötete, so war seine Tat offensichtlich kein vorsätzlicher, arglistiger, böswilliger, sorgfältig geplanter Mord, sondern allenfalls Totschlag – oder noch zutreffender: Körperverletzung mit Todesfolge. Die Massentötung war ein Unfall, kein geplantes Verbrechen, ohne Vorsatz und allem Anschein nach auch ohne jeden Sinn und Zweck.

Wer aber beging die Tat?

Die Neutronendetektive fanden Indizien, die einen Meteoriten belasten. Der Verdächtige, der nach Beschreibungen bis zu einer Trillion Tonnen schwer gewesen sein soll, als man ihn «zum letzten Male sah», raste mit einer Geschwindigkeit von einigen zehn Kilometern pro Sekunde auf die Erde zu. Es war ein selbstmörderischer Sturz. Man fand «Haarsträhnen» des Killers, doch nicht seinen Leichnam. Auch die rauchende Pistole in Form eines Einsturzkraters wurde nicht positiv identifiziert. Deshalb ist der Untersuchungsrichter im ungewissen, ob der eingeschlagene Meteorit ein Asteroid oder ein Komet war.

Und wie ging der Täter vor?

Diese Frage ist am schwersten zu beantworten, und doch dürfte gerade ihre Lösung wesentlich dazu beitragen, die Unschuldigen von den Schuldigen zu trennen, denn Asteroiden und Kometen gehen ja möglicherweise ganz verschieden vor, wenn sie beim Einschlag ihr Zerstörungswerk verrichten.

Die erste von vier Konferenzen, die während des akademischen Jahres 1981/1982 abgehalten wurden, um Fragen im Zusammenhang mit dem endkreidezeitlichen Massaker zu untersuchen, wurde im Mai 1981 von Dale Russell einberufen, der ein Dinosaurierexperte war. Etwa zwei Dutzend von uns trafen sich im Naturhistorischen Nationalmuseum von Ottawa, Kanada. Viele von uns wollten dort ihre eigenen Vorstellungen und Thesen darlegen. Vater und Sohn (Luis und Walter) Alvarez, Vic Clube, Bill Napier, Jan Smit, Dewey McLean, Hans Thierstein und ich waren von der Partie. Eingeladen

war auch ein Doktorand von der Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA), Frank Kyte. Er und sein Professor, John Wasson, hatten im Nordpazifik gewonnene «Grenzton»-Proben aus dem Grenzbereich zwischen Kreide und Tertiär analysiert und in ihnen dieselbe hohe Konzentration von Iridium und anderen siderophilen Metallen gefunden wie Luis und Walter Alvarez in ihren Proben aus Stevn's Klint. Außerdem hatten sich ein paar Spezialisten für Astronomie, Einschlagmechanik, toxische Chemie, Paläobotanik und Dinosaurier-Paläobiologie angeschlossen. Sie halfen uns dabei, offen und ehrlich miteinander umzugehen.

Doch einer solchen Konferenz muß man freien Lauf lassen. Wie widersinnig sich Denkmodelle aus der Frühphase eines neuen Forschungsbereichs später auch ausnehmen mögen – wenn man sie einem Gremium von Sachkundigen vorträgt, werden ihre rauen Kanten abgeschliffen und die besten Gedanken herausgearbeitet. Die meisten von uns kamen in der Überzeugung, daß der Einschlag eines Himmelskörpers die Katastrophe der Endkreidezeit ausgelöst hatte, aber dennoch konnten wir uns auf kein detaillierteres Szenario einigen. Die Veröffentlichung, die dieser Konferenz folgte, hatte daher eher die Form von Kurzprotokollen unserer Diskussionen am runden Tisch, ohne daß eine allgemeine Zusammenfassung möglich gewesen wäre.

Eine überzeugend klingende Rekonstruktion der Vorgehensweise des Täters legte die Alvarez-Gruppe aus Berkeley vor. Man nannte ihr Modell etwas salopp auch «Finsternis am hellichten Tage». Wenn, so vermuteten diese Wissenschaftler, ein Meteorit von 10 Kilometern Durchmesser vor 65 Millionen Jahren auf die Erde schlug, dann mußte durch den Aufprall pulverisiertes Felsgestein aus dem Explosions- bzw. Einschlagkrater in die Stratosphäre geschleudert worden sein, wo es sich rasch über den gesamten Erdball verbreitete und massiv den Einfall des Sonnenlichtes behinderte, das normalerweise den Erdboden erreicht. In der Dunkelheit, die dies nach sich führte, fand keine Photosynthese mehr statt, und die Unterbrechung der Nahrungskette direkt an der pflanzlichen Basis rief jenes Muster des Aussterbens hervor, das sich im paläontologischen Befund abzeichnet. Die Ton-schicht, in der in Italien und Dänemark die Iridiumanomalie gefunden wurde, mußte, so vermuten die Wissenschaftler, von dem Staub herrühren, der sich während der nächsten Jahre nach dem Einschlag allmählich auf die Erde herabsenkte. Das Konzept «Finsternis am hellichten Tage» schien auf den ersten Blick sehr einleuchtend. Allerdings wußten wir von den Folgen eines solch ungewöhnlichen Zusammenpralls eines kosmischen Objektes mit der Erde nicht viel, und deshalb erhoben sich viele Fragen: Gewiß wäre Gesteinstaub in die Atmosphäre geschleudert worden, doch hätte er sich auch schnell über die ganze Erde verbreitet? Hätte die Staubmenge ausgereicht, das Sonnenlicht völlig zu blockieren? Dauerte die Finsternis lange genug, um die Photosynthese der Pflanzen nachhaltig zu unterbinden und so das Aussterben zahlreicher Organismen zu bedingen? Und schließlich: War der dänische «Grenzton» eine Schicht von ausgeworfenen Aufschlagstrümmern, die sich wenige Jahre nach dem Einsturz angesammelt hatten?

Um all diese Fragen zu beantworten, bedurfte es der Hilfe vieler Spezialisten, und diese hatten ihren Auftritt, nachdem Luis und Walter Alvarez ihr Manifest vorgetragen hatten. John O'Keefe und Tom Ahrens von der Technischen Hochschule Kaliforniens, Bill Melosh von der Staatlichen Universität New York in Stonybrook, Don Orphal aus Livermore, Peter Schultz und Steven Croft vom Mond- und Planetenobservatorium in Houston, Eric Jones und John Kodis aus Los Alamos, Brian Toon vom *NASA Ames Research Center* in Kalifornien, Don Gault vom Murphy-Zentrum für Planetologie und zahlreiche andere Experten führten Untersuchungen über die Mechanismen eines Einschlages durch und berechneten die Auswirkungen eines direkten Zusammenpralls der Erde mit einem extraterrestrischen Objekt von 10 Kilometern Durchmesser. Manche arbeiteten mit Computern, andere bevorzugten Experimente im Labor. Alle aber wurden zu der zweiten Konferenz über das Massensterben am Ende der Kreidezeit eingeladen, die dann im Oktober 1981 in Snowbird, Utah, stattfand und vom Institut für Mond- und Planetenforschung in Houston, Texas, ausgerichtet wurde.

Diese Snowbird-Konferenz wurde von Lee Silver vom kalifornischen Technikum organisiert. Sie stand unter dem Motto: «Einschläge großer Himmelskörper und Evolution auf der Erde: Geologische, klimatologische und biologische Auswirkungen». Lee Silver kannte ich sehr gut aus meiner Studienzeit. Beide hatten wir in Südkalifornien die metamorphen Felsgesteine der San-Gabriel-Berge untersucht. Während mich aber mein beruflicher Werdegang schließlich zur Meeresgeologie führte, hatte sich Silver auf die Planeten spezialisiert. Er gehörte zu denjenigen, die die amerikanischen Astronauten über die Beschaffenheit der Mondoberfläche beraten hatten, bevor diese auf unserem Trabanten landeten. Wir hatten uns in ganz verschiedene Richtungen entwickelt. Seit Jahren hatte ich von ihm nichts gehört, von einem Brief abgesehen, in dem er als Präsident der Geologischen Gesellschaft Amerikas mich von meiner Wahl zum Ehrenmitglied dieses hochangesehenen Gremiums in Kenntnis setzte. Deshalb war ich nicht wenig überrascht, als man wir während einer dreimonatigen Vortragsreise durch Neuseeland und Australien eines Tages sagte, Lee Silver habe aus Pasadena angerufen. Es sei dringend, und ich solle sofort zurückrufen.

Silver forderte mich auf, nach Snowbird zu kommen. Ich wollte nicht, denn ich dachte, alles, was ich zu sagen hatte, hätte ich schon in Ottawa vorgebracht. Außerdem war ich damals schon genug umhergereist. Doch Silver ließ keine ablehnende Antwort gelten. Nachdem ich eine halbe Stunde lang eine transpazifische Telefonverbindung blockiert hatte, stimmte ich zögernd zu, in der Hauptsache, um dem entsetzlichen Telefon zu entgehen. Im Oktober hatte ich meine Koffer kaum ausgepackt, als ich erneut packen mußte, um nach Salt Lake City zu fliegen.

Mein Auftritt in Snowbird war wenig brillant. In meiner Hast hatte ich vergessen, die Dias mitzunehmen, die meinen Vortrag illustrieren sollten. Ich schämte mich, nahm Zuflucht zu einer Lüge und beschuldigte die Fluggesellschaft, mein Gepäck fehlgeleitet zu haben. Allerdings wußten meine

Freunde, daß ich wichtige Dokumente nie meinen Koffern anvertraue, sondern sie immer bei mir tragen würde. Davon abgesehen, war ich aber doch froh, nach Snowbird gereist zu sein, denn immerhin lernte ich eine ganze Menge. Vorher hatte ich über die Folgen riesiger Meteoriteneinschläge nur wenig Ahnung gehabt. Dies hatte sich nunmehr etwas gebessert, und ich war imstande, mich von falschen Vorstellungen zu distanzieren, und neue, gangbare Alternativen zu versuchen.

Die Einschlagmechanik eines großen Himmelskörpers ist völlig anders als bei einem kleineren Objekt. Kleine Meteore verglühen oder zerfallen in ihre Bestandteile, denn der Weg, den sie durch die Atmosphäre zurückzulegen haben, ist um ein Vielfaches länger als ihr eigener Durchmesser. Die Atmosphäre besitzt eine Tiefe von 7,1 Kilometern, während die mittlere Tiefe der Ozeane 3,6 Kilometer beträgt. Doch ein Meteorit, der eine Trillion Tonnen wiegt und einen Durchmesser von 10 Kilometern hat, ist maximal so dick wie die Atmosphäre und der Ozean zusammen. O'Keefe und Ahrens wiesen darauf hin, daß der Einschlag ein riesiges Loch in die Atmosphäre reißen würde. Dieses atmosphärische Loch wäre noch nicht geschlossen, wenn der Himmelskörper auf die Erde aufprallte, und es würde die Aufschlagtrümmer ansaugen, so daß ein riesiger Feuerball entstünde. Selbst dort, wo der Ozean 5 Kilometer tief ist, vermag er einen Meteoriten nicht zu stoppen, der mit 20 Kilometern pro Sekunde auf die Erde zurast, obwohl bei seinem Sturz immerhin so viel Druck entstehen würde, daß die Fallgeschwindigkeit auf etwa 6 Kilometer pro Sekunde abgebremst würde. Doch wie dem auch sei – die Energiemenge, die ein Meteorit bei seinem Fall durch die Atmosphäre und das Meer verliert, kann nicht sehr erheblich sein. Es sind gewiß weniger als 5 % durch die Luft und 15 % durch das Wasser. Der Löwenanteil dieser kinetischen Energie würde erst beim Aufprall freigesetzt. Es entstünde ein großer Krater, dessen Grund mit geschmolzenem Felsgestein gefüllt wäre. Die aus dem Krater geschleuderten Trümmer würden zusammen mit Luft, Wasser, Dampf und verdampfender Meteoritenmaterie als riesige Rauchsäule in den Himmel steigen – eine Rauchsäule, deren Durchmesser viele Kilometer betrüge und die sich in der Stratosphäre nach allen Seiten hin ausbreitete, so daß die typische Pilzform entstünde.

Die Menge der aus dem Einschlagkrater geschleuderten Partikel wäre enorm, und das herausgeschleuderte Material bestünde aus Trümmern jeder Größenordnung. Größere Gesteinsbrocken würden wie riesige Geschosse rings um den Krater zu Boden fallen oder sich in Form von Erd- und Gesteinslawinen nach allen Seiten hin verbreiten. Feinere Partikel würden schmelzen, verdampfen oder als Feuersäule mit Überschallgeschwindigkeit in die Höhe schießen. Wenn der Himmelskörper in den Ozean schlug, kämen ungeheure Mengen Wasserdampf hinzu. Jones und Kodis gaben eine dramatische Schilderung der ersten paar Minuten nach einem solchen Aufprall: Der Feuerball wäre zunächst eine dünne Scheibe heißer Gase. Diese Scheibe würde sich explosionsartig ausdehnen, hätte nach einer Sekunde nahezu Kugelgestalt und stiege als heiße Gassäule empor, bis sie – dies noch

in der ersten halben Minute – eine Höhe von 30 Kilometern erreicht hätte. Schließlich würden sich auch die Auswürflinge eine Minute nach dem Aufprall als Pilzwolke in der Stratosphäre ausbreiten. Feines Auswurfmaterial könnte bis zu einer Höhe von 100 Kilometern und mehr emporgetragen werden.

O'Keefe und Ahrens äußerten die Vermutung, daß sich nur die feinsten Partikel von weniger als einem Mikrometer Durchmesser lange genug in der Atmosphäre halten könnten, um sich über den gesamten Erdball zu verteilen. Die anfangs glutflüssigen Partikel von Millimeter- bis Zentimetergröße würden ebenfalls in die Höhe gerissen, gelangten aber in der Fallinie des Meteoriten auf die Erde zurück. Ausgekühlt, würden sie als glasige Tektite oder als glasige, steinerne oder eiserne Mikrotektite in die Erdatmosphäre zurückstürzen.

Schon auf der im vorhergehenden Herbst in Ottawa stattfindenden Konferenz waren verschiedene Versuche unternommen worden, die Katastrophe zu rekonstruieren. Vor allem hatte man sich nicht darauf einigen können, welche Art von Himmelskörper für sie verantwortlich wäre. Ich dachte zunächst an einen Kometen, und zwar wegen des Giftes, das Kometen enthalten. Doch Luis und Walter Alvarez hielten an ihrer These fest, daß es sich um einen Asteroiden handelte. Einer der Pluspunkte, die sie für ihre These verbuchen konnten, war der hohe Anteil an Iridium, den das Objekt gebracht hatte.

Ein Komet, ein «schmutziger Schneeball», enthält weit weniger Gestein und daher auch weit weniger Iridium als ein Asteroid gleicher Größenordnung, der im Gegensatz zu ihm aus massivem Gestein besteht. Tatsächlich ist die Menge des Iridiums, das im «Grenzton» nachgewiesen wurde, verblüffend hoch. Um so viel Gestein abzulagern, mußte der Asteroid 100 Milliarden Tonnen wiegen. Ein Komet dagegen hätte das Zehnfache davon wiegen müssen, nämlich eine Trillion Tonnen. Die beiden Alvarez hielten einen kleineren Himmelskörper für wahrscheinlicher, wie Luis Alvarez, der Vater, 1982 in einem Vortrag vor der amerikanischen Akademie der Wissenschaft erklärte. Aber die Tatsache, daß eine These akzeptabel erscheint, ist allein noch kein überzeugendes Argument.

Robert Grieve stützte seine Berechnungen auf die vielen Krater, die er untersucht hatte, und berichtete, daß ein gewöhnlicher Meteorit aus Stein und Eisen terrestrisches Auswurfmaterial freisprengen kann, das etwa dem Hundertfachen seiner eigenen Größe entspricht. Ein Asteroid von 100 Milliarden Tonnen könne mithin 10 Trillionen Tonnen Auswurf in die Atmosphäre schleudern. Zwar würde nur ein kleiner Bruchteil davon als Fallout aus der Stratosphäre zu Boden stürzen, doch der Einfall von Staubpartikeln, die schließlich doch vom Himmel zurück zur Erde gelangten, wäre in einem solchen Fall mehr terrestrischer als kosmischer Herkunft.

Doch die Iridiumkonzentration des «Grenztons» ist an mehreren europäischen Stätten so hoch, daß unmöglich hundertmal mehr irdischer als kosmischer Staub auf die Erde gefallen sein kann. Die terrestrischen Anteile können nicht mehr als das Zehnfache des Materials des einschlagenden

Objektes betragen haben. Selbst wenn der gesamte «Grenzton» aus dem Fallout der Einschlagkatastrophe herrührt, so können doch die aus dem Krater gesprengten Anteile nicht mehr als das Zehnfache des Objektes ausmachen, das zur Erde gestürzt war.

Frank Kyte und John Wasson von der Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA) hatten sich mit dem Problem des ungewöhnlich hohen Iridiumgehaltes beschäftigt und waren zu der Folgerung gelangt, der einschlagende Körper müsse eine geringe Dichte von 0,1 Gramm pro Kubikzentimeter gehabt haben und sei daher – mit anderen Worten – nicht dichter als ein Schneeball gewesen. Damit erklärten sie den enorm hohen Anteil an terrestrischem Material an den Auswürflingen des «Grenztons». Ein derartiges Objekt aber kann nur ein aus Eis bestehender Komet gewesen sein, nicht aber ein Asteroid aus massivem Felsgestein. Das geschätzte Volumen des Fallouts überzeugte die beiden Wissenschaftler, der auf die Erde gestürzte Komet müsse etwas mehr als eine Trillion Tonnen gewogen haben – dies bei einem Durchmesser von mehr als 10 Kilometern. Es muß sich um einen Kometen gehandelt haben, der etwa die Größe des Halleyschen hatte.

Doch nichts in der Naturwissenschaft ist so einfach. Die Aufmerksamkeit konzentrierte sich auf die Auswürflinge. Jan Smit hatte im «Grenzton» zwischen Kreidezeit und Tertiär bei Caravaca in Spanien zwei Arten von Mikrotektiten entdeckt. Die kleinere Variante ähnelte in ihrer Größe und in ihrer chemischen Zusammensetzung den *Sphaerulae* («Kügelchen») aus dem Gebiet der Tunguska, deren Iridiumgehalt dem eines eisernen Meteoriten ähnelt, denn er beträgt 56 900 Anteile pro Milliarde. Diese hohe Konzentration läßt vermuten, daß das Material unmittelbar von dem Meteoriten stammte, als dieser in der Atmosphäre explodierte, und es ist keinerlei Kontamination (Verunreinigung, Vermischung) mit terrestrischem Material festzustellen. Die größeren Mikrotektite dagegen haben einen Iridiumgehalt von nur 10,4 Anteilen pro Milliarde. Smit und seine Mitarbeiter schlossen daraus, daß diese runden, scheibenförmigen oder wie winzige Hanteln aussehende Mikrotektite ursprünglich Tröpfchen geschmolzenen Auswurfmaterials waren, das weitgehend aus dem Einschlagkrater ausgesprengt war, doch erhebliche Beimengungen kosmischer Herkunft enthielt.

Weitere Untersuchungen ergaben eine Spurenelementchemie, die der ozeanischer Gesteine ähnelte. Mithin scheint es, als ob diese Auswürflinge von einem Krater auf dem Meeresboden stammten. Beide Arten von Staub – die größeren Mikrotektite, deren Zusammensetzung der Erdkruste auf dem Boden der Ozeane ähnelte, und die winzigen Objekte mit eher kosmostypischer Komposition – waren tatsächlich auch vorher schon im Grenzton bei Gubbio gefunden worden. Inzwischen hat man auch an vielen anderen Stellen derartige Fallout-Trümmer gefunden, die offensichtlich von dem Einschlag herrühren.

Nachdem inzwischen sehr viel mehr Analysen durchgeführt wurden, wirft diese Entdeckung Zweifel auf, ob die These zutrifft, der geringe Anteil terrestrischer Trümmer, die sich im «Grenzton» mit Trümmern kosmischer

Herkunft mischen, deute eher auf den Einschlag eines Kometen als auf den eines Asteroiden hin. Unter Zuhilfenahme der großen Rechenanlage von Berkeley fanden O'Keefe und Ahrens bei ihren Arbeiten über die Verteilung des Auswurfmaterials heraus, daß beide Staubarten nicht dieselben Schicksale hatten. Die ursprünglichen Auswürflinge haben eine außergewöhnlich hohe extraterrestrische Komponente und eine extrem hohe Geschwindigkeit. Dieses aus der Anfangsphase des Einschlags stammende Auswurfmaterial kann eine höhere Konzentration kosmischen Ursprungs haben, die so hoch ist wie die der winzigen Partikel, die man bei Gubbio, Caravaca und Stevn's Klint gefunden hat. Die hohe Geschwindigkeit, mit der sie emporgeschleudert wurden, ließ sie bis zu zehn Kilometer oder mehr in die Stratosphäre fliegen, so daß sie sich rings um den Erdball verteilen konnten. Später emporgeschleuderte, weniger schnelle und mehr aus terrestrischem Material bestehende Trümmer stammten weitgehend aus dem Krater selbst und fielen meist zur Erde zurück, bevor sie derartige Höhen erreicht hatten. Daher verteilten sie sich auch nicht so großräumig. Den am wenigsten kontaminierten Fallout mußte man unmittelbar neben dem Krater, nicht aber im «Grenzton» finden. So gesehen, ist der mit kosmischen *Sphaerulae* angereicherte «Grenzton» nur ein schwacher Indikator des Gesamtverhältnisses zwischen terrestrischen und kosmischen Trümmern und infolgedessen keine Hilfe zur Beantwortung der Frage, ob ein Asteroid aus massivem Gestein oder ein Komet aus Eis den Krater geschlagen hat. Uns blieb daher nur die Feststellung übrig: Die Iridiumkonzentration des «Grenztons» kann uns nicht verraten, ob der eingeschlagene Meteorit ein Asteroid oder ein Komet war.

Dennoch steht nun immerhin zweifelsfrei fest, daß ein Meteorit auf der Erde einschlug und daß sein Einschlag eine Menge Staub aufwirbelte. Die Beschaffenheit der Mikrotektite bewies, daß das extraterrestrische Objekt nicht einfach in der Atmosphäre zerbarst wie das ebenfalls aus dem Kosmos stammende Tunguska-Objekt. Und sofern noch Zweifel bestanden, wurden sie ein paar Jahre später ausgeräumt, als Bruce Bohor, ein Tonmineraloge vom Geologischen Forschungsdienst der USA in Denver, den «Grenzton» im Ratonbecken untersuchte und neben normalen Sandkörnern und Schlammpartikeln auch eine Anzahl von Quarzkörnern fand, deren Struktur der des Minerals *Koësit* ähnelte, das man im Meteorkrater in Arizona und an anderen Stellen bedeutender Einschläge gefunden hatte. Der erforderliche Druck, um das Mineral *Koësit* zu bilden, ist so hoch, daß es an der Erdoberfläche nur durch den Aufprall eines mit hoher Geschwindigkeit auftreffenden Meteoriten erzeugt werden kann. Offen bleibt aber noch immer die Frage, ob die von diesem Einschlag herrührenden Auswürflinge die Sonne verfinstern konnten.

O'Keefe und Ahrens glaubten, die Auswürflinge hätten sich mindestens einige Wochen in der Atmosphäre halten müssen, um eine weltweite Verteilung zu erreichen. Die Wahrscheinlichkeit dafür sei jedoch nur bei dem allerfeinsten Staub gegeben gewesen. Partikel, die größer als ein Mikrometer sind, wären nach den Annahmen der beiden Wissenschaftler sehr rasch aus

der Stratosphäre zur Erde zurückgefallen. Auch kleinere Partikel, die miteinander zusammenstießen und Klümpchen bildeten, wären groß genug, um schnell zu Boden zu fallen. Brian Toon und seine Mitarbeiter stellten Berechnungen an und fanden, daß sich Partikel, die größer und gröber sind als 4 Mikrometer, in ein paar Wochen absetzen, solche dagegen, die gröber und größer sind als 2 Mikrometer erst in ein paar Monaten. Partikel, deren Durchmesser 0,5 Millimeter beträgt, fallen demnach innerhalb von drei Jahren zu Boden, aber nur dann, wenn sie nicht zusammen mit anderen größere und rascher herabfallende Aggregate bilden. Alle diese Ergebnisse legen daher die Vermutung nahe, daß größere Partikel wie zum Beispiel Mikrotektite sehr rasch wieder zu Boden gefallen sein müssen und nicht sehr weit verbreitet werden konnten.

Die *Sphaerulae* wurden erstmals in Spanien, Italien, Dänemark und an der *Deep-Sea-Drilling-Project* (DSDP)-Bohrstelle 465 im Nordpazifik gefunden – an Punkten also, die sämtlich in mittleren bis höheren nördlichen Breiten liegen. Daher war ich überzeugt, ein von Osten nach Westen hin gestreutes Tektitenfeld gefunden zu haben. Derartige Felder aus rasch herabfallenden Partikeln markieren die Flugbahnen vieler uns bekannter Meteoriteinschläge. Wenn sich also der Riesenmeteorit, der am Ende der Kreidezeit auf die Erde prallte, entsprechend Toons Berechnungen ebenso verhielt wie alle anderen Meteoriten, hätte sein Tektitenfeld vielleicht darauf hinweisen können, wo das kosmische Objekt eingeschlagen war. Doch kürzlich teilte mir Jan Smit brieflich mit, man habe endkreidezeitliche Mikrotektite an vielen Punkten sowohl der nördlichen als auch der südlichen Hemisphäre gefunden. Auch die Iridiumanomalie ist weltweit zu beachten. Beispielsweise berichtete Luis Alvarez 1982, daß überall dort, wo ein «Grenzsediment» anzutreffen ist, auch die Iridiumkonzentration hoch, allerdings auch beträchtlichen Schwankungen unterworfen sei. Auf Alvarez' Karte waren 36 Orte aus Italien, Dänemark und Spanien, aus dem Kaukasus, Neumexiko, Texas, Montana, dem Nordpazifik und Südatlantik, ja sogar aus Neuseeland verzeichnet. Aus seiner Erfahrung, die Luis Alvarez auf der Suche nach dem radioaktiven Fallout sowjetischer Wasserstoffbombentests in den fünfziger Jahren gesammelt hatte, schätzte er, daß der in die Stratosphäre gelangte Staubausschwurf nicht nur Wochen, sondern ein Jahr oder sogar noch mehr brauchen würde, um durch Stratosphärenwinde von der Nord- zur Südhalbkugel transportiert zu werden. Sämtliche Bestandteile dieses Staubes – mit Ausnahme der allerfeinsten – mußten sich also längst zur Erde herabgesenkt haben, bevor sie zur anderen Hälfte unseres Planeten getragen werden konnten. Unter Berufung auf Arbeiten von Jones und Kodis aus Los Alamos äußerte Alvarez die Vermutung, das einschlagende Objekt habe die Erde vielleicht in einem flachen Winkel getroffen. Wenn es einen solchen Aufprallwinkel gegeben hätte, könnten die «Bomben» und die ausgeworfenen Fragmente in eine ballistische Umlaufbahn um die Erde geschleudert worden sein, so daß ganz andere Mechanismen – nicht nur Stratosphärenwinde – wirksam wurden, die die Tektite und *Sphaerulae* innerhalb weniger Stunden

rings um den gesamten Erdball trugen. Doch gleichgültig, ob ein auf die Erde geprallter Meteorit die richtige Erklärung ist oder nicht – Tatsache ist es, daß weltweit Trümmer verstreut wurden, und nach der überall anzutreffenden Iridiumanomalie zu urteilen, gab es eine große Menge solcher Trümmer.

Reichte das Auswurfmaterial aus, um die ganze Erde mit einer Staubbülle zu umgeben, die das Sonnenlicht absorbierte und die Photosynthese der Pflanzen verhinderte? Siegfried Gerstl und Andrew Zardecki aus Los Alamos untersuchten den Rückgang der Photosynthese unter einer extremen Decke von in der Stratosphäre schwebenden Staubeilchen. Sie legten dabei bekannte Ausgangswerte von Vulkanen zugrunde, die große Mengen Asche auswarfen. So wurde nach dem Ausbruch des Krakatau im Jahre 1883, der etwa 100 Millionen Tonnen Aerosol (in der Luft schwebende Partikel) in die Stratosphäre schleuderte, der Sonnenlichteinfall um 10–25 % verringert, und immerhin um 20 % nach dem Ausbruch des Katmai im Jahre 1912, der nur halb so viel Asche ausspie. Gerstls und Zardeckis Modellberechnungen ergaben, daß etwa 40 Milliarden Tonnen Staub in der Atmosphäre erforderlich wären, um die Sonneneinstrahlung auf ein Tausendstel ihres Lichtwertes zu reduzieren, also um Dunkelheit zu erzeugen.

Ein großer Komet brauchte auf der Erde nicht einmal aufzuschlagen, um diese Staubmenge zu produzieren. Schon ein Beinahe-Zusammenstoß würde genügen, um vollständige Finsternis hervorzurufen.

Toon ging von einer etwas höheren Ziffer aus, nämlich von 50 Milliarden Tonnen Stratosphärenstaub. Er nahm an, der Staub sei mit etwa 10 Milligramm pro Quadratcentimeter verteilt. So kam er zu demselben Ergebnis wie Gerstl und Zardecki: Bei einer solchen Menge Staubes würde der Tag zur finsternen Nacht und brächte die Photosynthese vollständig zum Erliegen. Weil Pflanzen aber eine Zeit lang von gespeicherter Energie leben können und die Photosynthese wieder anläuft, sobald sich der Himmel wieder lichtet, ist für das Denkmodell entscheidend, mit welcher Geschwindigkeit sich der Staub wieder absetzte. Toons Berechnungen zufolge ging das recht schnell vor sich; schon etwa drei Monate nach der Verdunkelung konnte die Photosynthese wieder in Gang kommen.

Selbst wenn man bei den Berechnungen von viel größeren Staubmengen ausginge – etwa von Trillionen oder gar einigen zehn Trillionen Tonnen Staub –, wäre der Himmel nach drei Monaten schon wieder so hell wie in einer klaren Vollmondnacht und damit hell genug, damit nach vier Monaten die Photosynthese wieder anlief. Toon rechnete damit, daß sich kleinere Partikel zu größeren Aggregaten zusammenklumpten und daher nach relativ kurzer Zeit zu Boden fielen. Wären sie getrennt geblieben und hätten sich deshalb in langsameren Tempo niedergeschlagen, hätte die Dunkelheit länger als ein Jahr gedauert, doch dies hielt Toon in hohem Grade für unwahrscheinlich. Aller Wahrscheinlichkeit nach dauerte die Dunkelheit nur ein paar Monate, gleichgültig, wie massig der Komet oder Asteroid war, der die Erde getroffen hatte.

War der Meteorit aber in den Ozean gefallen, dann war der Feuerball der Auswürflinge in eine riesige Dampfblase gehüllt. Steven Croft entwarf Denkmodelle für den Sturz eines kosmischen Objekts in den Ozean. Ein aus Gestein bestehendes Objekt von 10 Kilometern Durchmesser, das mit einer Geschwindigkeit von 15–30 Kilometern pro Sekunde in eines der Weltmeere fällt, würde eine Wassermenge zum Verdampfen bringen, die das Hundertfache seines eigenen Volumens ausmacht – 1000 bis 5000 Kubikkilometer mit einem Gewicht von 1 bis 5 Trillionen Tonnen. Die Säule des verdampfenden Wassers könnte einen Durchmesser von 20 bis 30 Kilometer haben und sich schon eine Minute nach dem Einschlag Zehntausende von Metern hoch erheben. Der Ozean würde an der Einschlagstelle tatsächlich kochen!

Die Menge des in die Luft geschleuderten Wasserdampfes würde die Stratosphäre über dem Einschlaggebiet auf Tausende von Kilometern nach allen Seiten hin mit Feuchtigkeit übersättigen. Der Dampf würde sich rasch kondensieren und aus der Atmosphäre als Regen oder Schnee zur Erde fallen. Nach Crofts Schätzungen hätte die Erde schon nach ein paar Monaten den größten Teil dieses Wasserdampfes in Form von Niederschlägen zurückerhalten. Die Gesamtniederschlagsmenge stiege auf etwa 1000 Meter, dies ergibt eine Durchschnittsrate von 5 bis 10 Metern pro Tag. Ich kann nicht anders – ich muß hierbei abermals an die Bibel denken, und zwar an die Erzählung von der Sintflut (*Genesis*, 1. Mos., 6,5–8,17). Dort heißt es, es habe «vierzig Tage und vierzig Nächte» geregnet (*Genesis*, 1. Mos., 7,12). Das ist rein wissenschaftlich betrachtet nicht unmöglich und wäre noch wahrscheinlicher, wenn ein riesiger Meteorit in den Ozean gestürzt wäre. Außerdem könnten auch die dichten Wolken nach einem Einschlag in den Ozean den Himmel verdunkeln. Andererseits aber hätten Schnee und Regen die Atmosphäre entstaubt und die Rückkehr des Sonnenlichtes beschleunigt. Noch niemand hat bisher diese beiden einander widersprechenden Effekte berechnet, doch das Szenario der zeitweiligen Verfinsternung scheint mir anwendbar, ob der Meteorit nun auf einen Kontinent oder ins Meer stürzte.

Welche Folge aber hatten wohl einige Monate Dunkelheit für die lebenden Organismen? Obgleich niemand aus dem Alvarez-Team behauptete, Biologe oder Paläontologe zu sein, gingen Luis und Walter Alvarez doch das Wagnis ein, einige biologische Konsequenzen der Verdunkelungsthese durchzudenken. Doch ihre Folgerungen waren weder besonders neu noch in allen Einzelheiten gut überlegt. Vater und Sohn Alvarez und ihre Mitarbeiter verbanden die Dunkelheit mit der alten Hungertheorie und erwogen einen Zusammenbruch der Nahrungskette durch die vorübergehende Unterbrechung der Photosynthese bei den Pflanzen und das Massensterben des Phytoplanktons im Ozean. Nach ihrer Ansicht verhungerten immer höher organisierte Mitglieder der Nahrungskette, weil das Phytoplankton abstarb. Deshalb starben auch die *Foraminiferen*, sämtliche *Belemniten*, die *Ammoniten* und die Reptilien im Meer.

Die zweite Nahrungskette beruhte auf den Pflanzen zu Lande. Wie die Wissenschaftler vermuteten, starben während der Periode der Dunkelheit die vorhandenen Pflanzen ab oder schlugen zumindest nicht mehr neu aus. Selbst wenn nach der Rückkehr des Lichtes aus Samen oder aus noch lebenden Wurzelstöcken neue Pflanzen gesprossen sein sollten, wären doch große pflanzenfressende oder auch fleischfressende Tiere, die mittelbar oder unmittelbar von der Vegetation abhängig waren, inzwischen ausgestorben. Die kleineren Landtiere, die überlebten, darunter die Vorfahren unserer Säugetiere, konnten vielleicht die Katastrophe überstehen, weil sie sich von Nüssen, Samen, Insekten und der verfaulenden Vegetation ernährten.

So verblüffend einfach die Hypothese der beiden Alvarez auch ist – leider genügt die Feststellung nicht, daß sich die Dunkelheit tödlich auswirkt und daß das Aussterben einiger Arten tödliche Folgen bis hinauf an die Spitze der Nahrungskette hat. Das kreidezeitliche Massensterben weist ein ganz bestimmtes Muster auf, und wenn eine Theorie es erklären soll, dann muß diese Theorie sowohl auf die ausgestorbenen wie auch auf die überlebenden Organismen anwendbar sein.

Das Rätsel der Katastrophe am Ende der Kreidezeit besteht nicht so sehr darin, warum viele Arten ausstarben, sondern warum einige überhaupt überlebten. Hart betroffen wurde das an der Oberfläche der Ozeane lebende Meeresplankton. Tief am Meeresboden heimische benthische Organismen aber kamen davon. Von den Plankton-Lebewesen wurden diejenigen nahezu ausgerottet, die Skelette aus Kalziumkarbonat besaßen, wogegen die mit Kieselsäurepanzern ausgerüsteten nahezu ungeschoren überlebten. Die schwimmenden *Ammoniten* und *Belemniten* wurden ausgerottet, doch die nautilusartigen Mollusken überlebten die Krise. Unter den benthischen Organismen, die in flachen Gewässern lebten, war die Todesrate gleichfalls unterschiedlich: *Echinoiden* (Seeigeln) ging es besser als *Brachiopoden* (Armfüßern), und während *Brachiopoden* auf schlammigen Böden überlebten, kamen ihre Verwandten, die Kalkböden bevorzugten, um. Kleine wirbellose Süßwassertiere – z. B. Fluß- und Seemuscheln – schienen überhaupt nicht betroffen worden zu sein. An Land erwiesen sich besonders die größeren Tiere, vor allem die mit einem geschätzten Körpergewicht von mehr als 25 Kilogramm als verwundbar. Diese Selektivität des endkreidezeitlichen Massensterbens ist der verblüffendste Aspekt dieses Ereignisses, und hier kann nur dann Klarheit gewonnen werden, wenn die Biologie der unterschiedlichen Organismen verstanden wird, denn das Verderben (oder auch nur eine vorübergehende Krise) der einen Kreatur ist die Chance der anderen. Und dies hängt stets davon ab, wie jede einzelne ihr Leben nach den ihr gemäßen Bedingungen leben kann.

Das Alvarez-Team zum Beispiel betrachtete es als axiomatischen Grundsatz, daß (pflanzliches) Phytoplankton nicht sehr lange ohne Licht leben kann. Doch ist die totale Finsternis der Normalzustand in den Polregionen, wo Phytoplankton und das (tierische) Zooplankton, das sich von ihm ernährt, ihr Leben verbringen. Mag sein, daß sich das Plankton in dunklen

Polarwintern nicht vermehrt, doch immerhin erhält es sich zumindest während der dunklen Monate lebendig und blüht jedes Frühjahr neu auf. Ich fragte meine Freunde von der Meeresbiologie, wie dies wohl zugehe.

Phytoplankton, so erwiderte man mir, hat wie die *Coccolithen* bestimmte Lebenszyklen, die sich aus einer aktiven Phase, in der das Lebewesen auch beweglich ist, und einer Schlafperiode zusammensetzen. Die winzigen Einzeller vermehren sich durch Teilung (bzw. Spaltung) während ihrer aktiven Phase; manche Arten bringen es auf vier Teilungen pro Tag. Geht ein Phytoplankton-Organismus in die Schlafperiode über, verliert die Zelle ihr peitschenartiges *flagellum* («Geißel») und kann sich danach nicht mehr selbständig fortbewegen. Bei manchen Phytoplanktonarten verbirgt sich die lebende Zelle in einer Zyste wie ein Bär in seiner Höhle. Ein solcher Organismus, der schlafend in seiner Zyste eingeschlossen ist, benötigt keine Photosynthese und kümmert sich nicht darum, ob es draußen hell oder dunkel ist. Schließlich spaltet sich die nicht mehr bewegliche Zelle abermals und bringt eine Anzahl von Tochterzellen hervor, die dann, von ihren *flagella* durchs Meer getrieben, die beweglichen Schwärmer der nächsten Generation bilden. Nannoplankton der Meere polarer und gemäßigter Zonen kann sich also in eine Art Winterschlaf versetzen. Dieser Lebenszyklus erlaubt es solchen Wesen, lange, kalte und dunkle Winterperioden zu überstehen. Daher dürfen wir wohl annehmen, daß eine kurzfristige weltweite Dunkelheit einen großen Teil der Phytoplankton-Organismen in deren Schlaf- oder Zystenphasen versetzt hat. Doch sobald das Licht wiederkehrte, ging es mit der Fortpflanzung weiter.

Wenn das (pflanzliche) Phytoplankton eine Phase der Finsternis überleben konnte, gilt dies dann auch für das (tierische) Zooplankton? Auch diese Lebewesen wechseln zyklisch zwischen einer aktiven Phase und einer Schlafperiode. Meine Kollegin Hedi Oberhänsli und eine Gruppe Tübinger Wissenschaftler untersuchten im tropischen Meer unweit von Barbados lebende planktonische *Foraminiferen*. Sie berichtete mir, die von ihr bevorzugte Art *Globorotalia sacculifer* folge in ihrer Lebensweise vom Mond abhängigen Zyklen. Noch nicht ausgereifte Angehörige des Schwarms tauchen weit in tiefe Gewässer hinab. Dort reifen sie heran und kehren bei Vollmond zur Meeresoberfläche zurück, um neue «Schwärmer» hervorzubringen. Die Lebensdauer eines Einzelorganismus dieser Art beträgt mithin einen Mondmonat. Wenn für den Hungertod mehrere Monate der Dunkelheit erforderlich waren, so kann sich die erste Generation dieser kurzlebigen *Foraminiferen* leicht vermehrt haben und wäre eines natürlichen Todes gestorben, bevor der Hunger kam. Allerdings hätte jede der Monat für Monat folgenden Generationen weniger Nahrung vorgefunden, denn ihre Futterpflanzen, das Phytoplankton, befänden sich ja in der Schlafphase und könnte erst wieder blühen, wenn das Licht zurückkehrte. Ob sich wohl schließlich doch alle zu Tode hungerten?

Ich richtete diese Frage an Jerry Lipps von der Universität von Kalifornien in Davis. Lipps ist Spezialist für lebende *Foraminiferen* der Polarregionen, wo das Zooplankton während der dunklen Wintermonate kein Futter findet.

Lipps berichtete mir, daß diese Kreaturen sich mit Beginn des Winters nicht mehr vermehren und bis zum folgenden Frühjahr, wenn wieder genug Futter vorhanden ist, einen Winterschlaf halten. Wie lange aber können sie so schlafen? Lipps wußte es nicht ganz sicher, meinte aber, dieser Zustand könnte gewiß mehrere Monate anhalten. Manche Formen seien sicherlich imstande, mehrere Jahre lang inaktiv zu verharren.

Soviel zu diesem axiomatischen «Grundsatz» des Alvarez-Teams. Zwar ist es gar nicht so abwegig gedacht, daß die Dunkelheit tödlich ist, doch ist es auf gar keinen Fall selbstverständlich, daß alle Individuen, insbesondere in den Polargebieten lebende Arten, die bereits an monatelange Dunkelheit gewöhnt sind, einer derartigen Streßsituation nicht gewachsen sind und deshalb keine Nachfolgenerationen erzeugen können. Selbstverständlich ist eines klar: Massensterben führt nicht notwendigerweise zu Massenaussterben. Insbesondere wenn man die Auswirkung der Dunkelheit auf die Pflanzen an Land berücksichtigt, muß man sich bemühen, Massensterben und Aussterben auseinanderzuhalten.

Eine Dunkelheit von mehreren Monaten würde alle Pflanzen ernsthaft in ihrem Wachstum hindern. Sie würden vergilben und in Massen ihr Laub verlieren. Pollen-Assemblagen in Sedimenten haben hierfür eindrucksvolle Beweise geliefert. Robert Tschudy vom Geologischen Forschungsdienst der USA untersuchte die *Aquilapolleniten*-Flora, deren Aussterben am Ende der Kreidezeit im westlichen Nordamerika in den Sedimenten des Ratonbeckens das Ende der Kreidezeit markiert. Sie finden sich auf demselben Horizont, auf dem auch der letzte Dinosaurier gefunden wurde und auf dem Carl Orth und seine Kollegen aus Los Alamos im Grenzbereich Beweise für ein extraterrestrisches Ereignis in Form einer Iridiumanomalie erbracht hatten. Tschudys Pollendiagramm veranschaulicht eindrucksvoll, daß eine bedeutende Umweltveränderung stattgefunden hatte.

Die vorherrschende Vegetation in den sumpfigen Wäldern des Ratonbeckens bestand gegen Ende der Kreidezeit aus blühenden Pflanzen, sogenannten *Angiospermen* (bedecktsamigen Blütengewächsen). Viele davon waren Bäume. Hier und da wuchsen auch Farne, doch die Sporen, durch die sie sich vermehren, machen weniger als 5 % der von Tschudy untersuchten Pollen und Sporen-Assemblagen aus. Doch plötzlich – und zwar zu der Zeit, die der Horizont repräsentierte, in dem die Iridiumanomalie gefunden wurde – änderte sich die Vegetation auf dem Lande nahezu vollständig. Es gab praktisch keine Baumpollen mehr; Farnsporen stellten nun mehr als 90 % der Assemblage dar. Anscheinend waren sämtliche Bäume der Sumpfwälder zerstört, und nur Farne gediehen noch in der verwüsteten Landschaft. Tschudy verglich die katastrophalen Veränderungen mit denen, die er in den Vulkangebieten Indonesiens beobachtet hatte. An vielen Stellen hat dort glutflüssige Lava alle Bäume zerstört. Jahrzehntlang gedeihen lediglich Farne zwischen kahlen Lavablöcken, bevor der Wald wieder nachwächst.

Eine damit vergleichbare Veränderung, die sich in Tschudys Pollendiagramm abzeichnete, fand während jener Zeitspanne statt, die durch zwei nur

einen Zentimeter voneinander getrennte Proben begrenzt ist. Normalerweise repräsentiert ein Zentimeter ozeanischen Schlicks etwa 1000 Jahre, doch an Land findet die Sedimentation in der Regel sehr viel rascher statt als im Ozean. Nach der geringen Stärke des pollenarmen Sediments zu urteilen, müssen die Wälder des Ratonbeckens in sehr viel weniger als 1000 Jahren verschwunden sein. Tatsächlich können wir uns vorstellen, daß die Wälder in weniger als einem Jahr nach dem Meteoriteneinschlag abstarben.

Tschudy fand in den Sedimenten unmittelbar über dem «Grenzton» im Ratonbecken Fragmente von Holz, das bei hohen Temperaturen zu Kohle geworden war. Er schrieb dies ausgedehnten Waldbränden zu. Inzwischen wurde Tschudys Vermutung durch ein Chemikerteam der Universität Chicago bestätigt. Sie entdeckten Kohlenruß in dem schwärzlichen «Grenzton» von Stevn's Klint und dem Nordpazifik und identifizierten die Rußpartikel als Produkt von Waldbränden an Land. Tatsächlich enthält der «Grenzton» der Ozeane so viel Ruß, daß die Chemiker aus Chicago argwöhnten, ein Zehntel aller lebenden Organismen, Tiere wie Pflanzen, sei bei katastrophalen Flächenbränden umgekommen, die nach dem Meteoriteneinschlag um sich griffen.

Es fällt nicht schwer, sich vorzustellen, wie die Erde nach der Katastrophe ausgesehen haben muß: Verbrannte Stämme und entwurzelte Bäume häuften sich in unentwirrbarem Durcheinander. Auf dem toten Holz müssen sich viele Pilze angesiedelt haben, und offensichtlich wucherten – jedenfalls nach Ausweis des Pollenbefundes – überall Farne. Nur hier und da gab es neu aufgekeimte junge Bäume, die ihre Kronen über das Wirrwarr organischer Trümmer erhoben.

Doch Tschudys Pollendiagramm lehrt uns auch, daß die Erholung relativ rasch vor sich ging. Die an Farnsporen reichen Ablagerungen sind sehr dünn. Schon ein paar Zentimeter über dem Grenzsediment finden wir wieder mehr Pollen als Sporen. Man könnte sich vorstellen, daß die neue Pflanzengeneration, die da heranwuchs, ein paar Dutzend Jahre brauchte, bis der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt war. Schon nach einem oder zwei Jahrhunderten könnte die Region wieder ein Wald voll blühender Bäume gewesen sein. Abgesehen von ein paar wenigen Arten, zu denen auch die *Aquilapolleniten*-Flora gehörte, die niemals wieder in Erscheinung trat, erholte sich die Pflanzenwelt schon recht bald.

Zwar berichten uns die Sporen und Pollen von einer Katastrophe erster Ordnung mit toten Wäldern und Lichtungen, auf denen keine Frühlingsblume mehr blühte, doch waren die Ereignisse offensichtlich unbedeutend für die lange Evolutionsgeschichte der Landvegetation, denn das Massensterben der Pflanzen an Land führte nur bei wenigen Arten auch zur Ausrottung. Wenn Tschudy sich nur mit Mustern des Aussterbens und den Veränderungen der Artenvielfalt befaßt hätte, wäre er wohl zu dem Schluß gelangt, daß am Ende der Kreidezeit nicht viel passiert sei.

Genau dies behauptete ein anderer bekannter Paläobotaniker, Leo Hickey von der *Smithsonian Institution*. In einer statistischen Analyse des

Überlebens der Pflanzenarten beiderseits der Grenzlinie zwischen Kreidezeit und Tertiär berechnete er die Prozentsätze der spätkreidezeitlichen Arten, die auch in frühtertiären Floren anzutreffen sind. Seine Ergebnisse veröffentlichte er in *Nature*, und zwar in einem Aufsatz mit dem Titel *Land Plant Evidence Compatible with Gradual, Not Catastrophic Change at the End of the Cretaceous* (Der Landvegetationsbefund spricht für allmähliche, nicht katastrophenartige Veränderungen am Ende der Kreidezeit). Hickey behauptete, das Überlebensmuster bei den Pflanzen sei zu willkürlich und zufallsgebunden, als daß man es mit einer Schreckenszeit weltumspannender Finsternis in Verbindung bringen könnte. Beispielsweise fand er heraus: 90 % der Pflanzen höherer südlicher Breiten (mehr als 60 Grad Süd) hatten überlebt, auch in mittleren südlichen Breiten waren es noch immer 60 %. Der Befund in den Tropen brachte sehr unterschiedliche Ergebnisse. An manchen Stellen hatten 100 % der vorhandenen Pflanzen überlebt, an anderen dagegen – und dies war das Minimum – nur 20 %. In hohen nördlichen Breiten war die Streuung sogar noch größer. Hier reichten die Befunde von 95 bis 5 %. Von der *Aquilapolleniten*-Flora in Sibirien und im westlichen Nordamerika wurden 75 % der kreidezeitlichen Arten ausgerottet. Die einzige Gesetzmäßigkeit, die Hickeys Analyse aufzuzeigen schien, war, daß die Zerstörung allem Anschein nach gegen Norden hin zunahm, doch er sah darin nichts Dramatisches.

In Wirklichkeit passen Hickeys Daten des selektiven Aussterbens sehr gut zu einer Katastrophe extraterrestrischen Ursprungs, wenn man sich die Lebenszyklen der betroffenen Arten vor Augen hält. Pflanzen wie das Phytoplankton können sich durch ihren «Winterschlaf» harten Zeiten anpassen, doch die Vorbereitung auf diesen Winterschlaf geht dem tatsächlichen Wintereinbruch ein paar Monate voraus. Eine etwa einen Monat dauernde totale Finsternis, die im April begänne, würde den Pflanzengemeinschaften hoher südlicher Breiten wenig Schaden zufügen. Im April begänne dort der Winter; die Pflanzen hätten ihre Vorbereitungen für die Winterzeit beendet, Stärke gespeichert und die Blätter abgeworfen. Wenn dann im September auf der Südhalbkugel wieder der Frühling eingekehrt wäre, wäre der Himmel ja auch wieder klar gewesen, und die Pflanzen hätten erneut sprießen können. Was also diese Floren der Südhalbkugel angeht, so wäre nichts geschehen, was ihren Lebensrhythmus gestört hätte.

Für die Flora der nördlichen Erdhalbkugel dagegen wäre eine Finsternis im April verheerend gewesen, denn hier liegt dieser Monat im Frühling. Die Pflanzen hätten hier ihren Winterschlaf beendet und wären in die aktive Wachstumsphase ihres Jahreszyklus eingetreten, für welche die Photosynthese erforderlich ist. Zu diesem Zeitpunkt hätte es also keinen Weg zurück in den «Winterschlaf» gegeben. Die Pflanzen wie auch die Samen wären abgestorben, denn auch die Keime der Samen hätten für die Photosynthese Licht gebraucht und wären zugrunde gegangen. Es hätte ein Massensterben gegeben, und das Aussterben ganzer Arten hätte ein viel größeres Ausmaß erreicht als auf der südlichen Hemisphäre. Genau dies bestätigen Hickeys paläobotanische Daten. Hickeys Muster, wonach im Norden bedeutend

schwerere Schäden entstanden sind als auf der Südhalbkugel, könnte also bedeuten, daß der Riesenmeteorit die Erde traf, als auf der nördlichen Erdhalbkugel gerade Frühling und auf der südlichen gerade Herbst war.

Auch eine Reihe anderer Überlegungen tragen zur Erklärung der Zahlen bei, die Hickey als «zufällig» ansah. Entscheidend ist zum Beispiel, wie lange Samen im «Winterschlaf» verharren. Um dies zu verdeutlichen, zitierte David Jarzen eine Studie der Keimungsmuster von mehr als 180 Arten malaysischer Bäume. In den dortigen Tropenwäldern keimen 65 % der Arten in einer Durchschnittszeit von 12 Wochen. Wenn der Meteorit im Frühling einschlug und der Staub sich drei bis vier Monate später verzogen hatte, so hatten die am raschesten keimenden Arten, die nur etwa sechs Wochen im «Winterschlaf» verharren, nur wenig Überlebenschancen. Für die Mehrzahl der Samen, die immerhin drei Monate inaktiv bleiben konnten, wären die Chancen nicht sehr groß gewesen. Doch in Regionen, deren Gewächse länger als drei Monate inaktive Samen hatten, wäre die Überlebensrate hoch gewesen.

Von den Arten, die überlebten, weil sie lange genug «Winterschlaf» halten konnten, gingen vielleicht einige im Laufe der nächstfolgenden Jahre zugrunde, weil sie sich nicht vermehren konnten. David Dilcher von der Universität Indiana vertrat die Ansicht, die blütentragenden Pflanzen der Kreidezeit seien von Insekten bestäubt worden. Im frühen Tertiär dagegen gab es eine rapide Ausbreitung windbestäubter Pflanzen. Ist dies nun als Hinweis auf ein katastrophales Insektensterben am Ende der Kreidezeit zu werten? Die Vermehrung insektenbestäubter Pflanzen wäre schwierig geworden, wenn es ein Massensterben unter den Insekten gegeben hätte, doch der Wind hätte nach wie vor wehen können wie eh und je, so daß während der ersten Erholungsjahre windbestäubte Arten Vorteile gehabt hätten.

Zwar erklärt das Modell der Finsternis am hellichten Tage die floralen Veränderungen am Ende der Kreidezeit, doch ist der Versuch nicht sehr überzeugend, dieses Modell auch auf die Dinosaurier zu übertragen. Wenn die Verfinsterung nur ein paar Monate dauerte, wie die Berechnungen nahelegen, blieb doch noch immer genug Nahrung übrig, um einige Pflanzenfresser am Leben zu erhalten. Auch muß es genügend Kadaver gegeben haben, um die Fleischfresser zu ernähren. Es ist schwer zu glauben, daß alle Dinosaurier, große und kleine, den Hungertod starben. Einige Wissenschaftler deuteten an, die Riesenechsen seien vielleicht während der dunklen Monate verhungert, weil sie ganz allein auf die Augen angewiesen gewesen seien, um ihre Nahrung zu finden. Allerdings fehlt nicht nur jeder Beweis, daß ihr Geruchs- und Gehörsinn unterentwickelt waren, sondern es ist auch unbewiesen, daß im Existenzkampf, der während der Dunkelheitsperiode herrschte, Nachttiere die besseren Chancen hatten.

Auch aus anderen Gründen ist das Modell der Finsternis am hellichten Tage schwach, und zwar nicht etwa, weil ein massiver Meteorit nicht genug Staub aufwirbeln könnte, um den Himmel zu verdunkeln, sondern weil auch

kleinere Meteoriten, welche die Erde alle paar Millionen Jahre treffen, das gleiche Resultat nach sich ziehen. Wie Gene Shoemaker – und der weiß, wie oft die Erde von Meteoriten bombardiert wurde – bei einer Diskussion bemerkte: «Wenn Dunkelheit allein dafür verantwortlich wäre, müßten wir Beweise für sehr viel mehr Massenaussterben haben.»

Der endgültige Prüfstein der Hypothese ist die Chronologie der Katastrophe. Wenn eine Verfinsterung für das Massenaussterben von Tier und Pflanzenarten am Ende der Kreidezeit verantwortlich war, so mußte die Tat im Dunkeln geschehen sein, bevor – schon nach ein paar Monaten oder, nach extremeren Schätzungen, nach ein paar Jahren – das Licht zurückkehrte. Doch starben wirklich alle *Ammoniten*, alle *Belemniten*, alle *Rudisten*, alle Dinosaurier und – bis auf wenige Arten – alles Nannoplankton sowie sämtliche *Foraminiferen* in so kurzer Zeit aus?

Überlebende – zum Untergang verurteilt

Der Boden des Ozeans ist ein Planktonfriedhof. Die zarten Gewebe abgestorbener Zellen oxydieren und werden zu Kohlendioxyd und Wasser. Nur Spuren von ihnen bleiben in den Sedimenten erhalten. Diejenigen Planktonarten allerdings, die sich härtende Substanzen absondern, hinterlassen Fossilien. Skelette von *Foraminiferen* und verschiedenen Nannoplanktonarten bestehen meist aus Kalziumkarbonat – jener Materie, aus der sich Kalkgestein bildet. Weniger häufig trifft man auf die fossilen Überreste von *Radiolarien* (Strahlentierchen) und *Diatomeen* (Kieselalgen), die Kieselsäure abgeben – jenen Grundstoff, aus dem Feuerstein besteht. In den Polarmeeren sind diese Strahlentierchen und Kieselalgen besonders aktiv, und deshalb bestehen die ozeanischen Schlämme hier ganz besonders aus Kieselskeletten. In fast allen anderen Fällen sind dagegen Kalkschlämme die Regel. In Tiefen von einigen hundert Metern und mehr ist das Meerwasser zu wenig mit Kalziumkarbonat gesättigt, so daß sich ein Teil des Kalkes der *Foraminiferen* und des Nannoplanktons löst. Allerdings geht dieser Auflösungsprozeß langsam vor sich. Die beständige Anhäufung neuer Planktonskelette verhindert, daß die alten ganz und gar verschwinden. Nur in Bereichen mit spärlicher Planktonproduktion oder in den tiefsten Gebieten des Ozeanbodens geht die Zersetzung rasch vonstatten, und die Algenskelette verschwinden vollständig. Als Sedimente bleiben dann allein unlösbare Reste sehr feiner Partikel übrig – ins Meer gewehter (oder gespülter) kontinentaler Staub und Staub aus dem Weltraum. Dieser Staub wird zu Tonen von gewöhnlich rötlicher Farbe, denn die untersten Wasserschichten in den sehr tiefen Bereichen sind nicht selten sehr sauerstoffreich und verwandeln das in den Sedimenten enthaltene Eisen zu Eisenoxyd (Rost).

Rote bzw. rötliche Tone findet man in Tiefen von 4000 Metern, wo Plankton sich nur langsam vermehrt, aber auch in 5000 Metern Tiefe, wo Plankton reichlich vorhanden ist. Die Trennlinie zwischen den weißen, kalziumhaltigen Schlämmen und den rötlichen (bzw. roten) Tonen bezeichnet man als Kalzitkompensationstiefe (englisch: *calcite compensation depth*; abgekürzt: CCD). Daß dabei von «Kompensation» die Rede ist, bezieht sich auf den Ausgleich zwischen dem Nachschub von Planktonskeletten und ihrer Auflösung. Oberhalb der Kalzitkompensationstiefe werden kalziumhaltige Schlämme abgelagert, weil hier die Zufuhr kalkiger Planktonskelette größer ist als deren Auflösungsrate. Unterhalb der kritischen Tiefe dagegen setzen

sich Tone nur noch ab, weil es sich hier genau umgekehrt verhält. Hier ist die Auflösungsrate größer als die Zufuhr. Diese CCD variiert von einem Meeresbereich zum anderen. Dies hängt einerseits mit Schwankungen der Planktonvermehrung zusammen, andererseits aber auch mit der unterschiedlich starken Korrosionswirkung des Seewassers.

Um zu veranschaulichen, was es mit der CCD auf sich hat, bediente sich Wolf Berger stets einer Analogie. Er forderte uns auf, uns einen Ozean ohne Wasser vorzustellen. Die Erhebungen des Meeresbodens wären dann Gipfel und Kämme mit weißen Hauben, als ob sie von Schnee bedeckt wären. Die niedrigeren Hangpartien dagegen, die Tiefseeebenen und gar die Tiefseegräben wären mit dunklen Ablagerungen aus rötlichen und bräunlichen Tönen bedeckt. Die CCD bildete dann die Trennungslinie zwischen Hell und Dunkel, ebenso wie im Hochgebirge die Schneegrenze Fels- und Firnregionen voneinander scheidet. Und wie die CCD liegt ja auch die Schneegrenze nicht überall auf gleicher Höhe. Auch sie ist eine Kompensationslinie – die Linie des Ausgleichs zwischen abschmelzendem und nachfallendem Schnee. In Regionen mit reichen Niederschlägen oder niedriger Temperatur, wo infolge der Kälte wenig oder gar kein Schnee abschmilzt, liegt sie niedrig. In Wüstengebieten ist sie dagegen hoch, da es dort an entsprechenden Niederschlägen fehlt. Das gilt auch für die Tropen mit ihren hohen Temperaturen. Entsprechend verhält es sich mit der CCD. Sie liegt in der Äquatorialzone niedrig, wo es reiche «Niederschläge» von Planktonskeletten gibt. In den Ozean-«Wüsten» mittlerer Breiten, wo die Planktonproduktion spärlich ist, oder in Gebieten mit aktiven Bodenströmungen, die oft sehr stark abtragende Wirkungen haben, liegt sie dagegen hoch.

Dies alles stand schon seit einiger Zeit fest, als ich mich 1968 der Leg-3-Südatlantik-Kreuzfahrt des Tiefsee-Bohrprojektes (*Deep Sea Drilling Project*; DSDP) anschloß. Ich war daher überrascht, an einer Stelle einen rötlichen Ton zu finden, wo er gar nicht hingehörte. Unser Bohrschiff untersuchte den Mittelatlantischen Rücken. Der Gipfel dieser Unterwasser-Gebirgskette liegt bei 2,5 Kilometern unter dem Meeresspiegel, und weil die CCD hier tiefer als 4,5 Kilometer liegt, ist sie mit weißem Schlick bedeckt. Rötliche Tone findet man eher in den zentral gelegenen Teilen der atlantischen Meeresgrundebenen, wo der Ozean mehr als 5 Kilometer tief ist. Und doch gerieten wir schon in mehreren Bohrlöchern an der Flanke des Mittelatlantischen Rückens ein gutes Stück über der heutigen CCD in rötlichen Ton.

Infolge meiner Ausbildung voller Vorurteile im Sinne Lyells verfaßte ich einen Bericht ganz und gar im aktualistischen Sinne. Ich äußerte die Vermutung, die CCD habe auch in der Vergangenheit im Südatlantik stets bei 4,5 Kilometern Tiefe gelegen, allerdings sei der Mittelatlantische Rücken seinerzeit noch nicht so hoch gewesen wie heute. Dieser Interpretation zufolge sind die älteren Sedimente rötliche Tone, weil der Kamm des Mittelatlantischen Rückens mehr als 4,5 Kilometer unter dem Meeresspiegel lag, so daß alle fossilen *Foraminiferen* und das Nannoplankton aufgelöst wurden.

Doch heute sehe ich, wie naiv dies alles war. Niemand käme beispielsweise auf die Idee, daß die Schneegrenze stets die gleiche Höhe hat. Die gesamte Schweiz – die Täler wie die Gipfelzonen – lag beispielsweise während der letzten Eiszeit oberhalb der Schneegrenze, nicht weil das Land damals höher lag, sondern weil seinerzeit, als Schnee und Eis kaum abschmolzen und große Mengen Neuschnee hinzukamen, einfach die Schneegrenze sehr viel niedriger lag. Es gibt nicht den mindesten Grund zu der Annahme, daß die kalkweiße «Schneegrenze» der Ozeane während der großen Epochen unserer Erdgeschichte stets die gleiche Tiefe hatte wie heute. Andere Gelehrte, die in der Folgezeit Tiefsee-Bohrfahrten unternahmen, stellten meinen Fehler auch sofort richtig. Sie argumentierten überzeugend, nicht der Kamm des Mittelatlantischen Rückens habe seine Höhe verändert, sondern die CCD habe sich verlagert – dies teils wegen des unterschiedlichen Nachschubs an kalziumhaltigen Skeletten aus höheren Meeresregionen, teils aber auch wegen veränderter chemischer Bedingungen am Meeresboden. Oben in den höheren Regionen des Mittelatlantischen Rückens befinden sich die rötlichen Tone in Sedimenten, die etwa 10 Millionen Jahre alt sind, denn damals lag die CCD besonders hoch. Bill Hay, einer der an Bord befindlichen Wissenschaftler der Leg-4-Kreuzfahrt, entwarf ein Diagramm, das deutlich das Auf und Nieder dieser Kompensationslinie im Laufe der letzten 100 Millionen Jahre veranschaulichte.

Hay unterrichtete damals an der Universität von Illinois. Einer seiner Doktoranden schrieb eine Dissertation über den Grenzbereich zwischen Kreide und Tertiär. In zahlreichen Gebieten der südlichen USA sind später ursprünglich ozeanische Sedimente der späten Kreidezeit und des frühen Tertiärs aufgefaltet worden. Man erblickt sie heute dort einfach am Straßenrand. Thomas Worsley sammelte seine Proben an einer Stelle unweit von Briggs, Alabama, weil dort die Fossilien vorzüglich erhalten sind, und dies bei einer kontinuierlichen Sequenz. Im kreidezeitlich-tertiären Grenzhorizont fand er eine harte Schicht, eine Art von Felsgestein, dem Kalziumkarbonat fehlte. Dies erinnerte ihn an den kalziumlosen «Grenzton» in Gubbio und anderen Orten. Worsley äußerte nun die verblüffende These, die CCD habe sich am Ende der Kreidezeit von der normalen Meerestiefe von 4,5 Kilometern bis zu einer Zone emporverlagert, in die noch Licht eindringt, und könne möglicherweise nur noch einige hundert Meter tief gelegen haben. Ja – er spekulierte sogar weiter: Die damals veränderte Chemie der Ozeane, welche die Verringerung der Kompensationstiefe bewirkt habe, habe vielleicht auch das Massenaussterben des Phytoplanktons hervorgerufen.

Wenige Experten nur nahmen Worsleys Spekulationen ernst. Aber die Kalzitkompensationstiefe hat sich verändert. Das ist eine Tatsache. Wir benötigten jedoch dringend Informationen über die Ursache dieser Schwankungen der CCD. Inzwischen hatte ich allen Grund, nicht nur meine eigene naive Interpretation der rötlichen Tone aus dem Südatlantik zu widerrufen, sondern aufgrund meiner Erfahrungen, die ich an Bord der Bohrschiffe gesammelt hatte, meine gesamte Einstellung zur Geologie Lyells in Frage zu stellen.

Das ursprünglich nur für 18 Monate bezuschußte Tiefsee-Bohrprojekt (*Deep Sea Drilling Project*; DSDP) hatte sich während der ersten Bohr-Kreuzfahrten als so erfolgreich erwiesen, daß der Kongreß der Vereinigten Staaten die weitere Finanzierung zusicherte. In der zweiten Phase des Unternehmens dampfte die *Glomar Challenger* in den Indischen Ozean, und das Hauptziel einer dritten Rundreise um die Welt war die Antarktis. Danach befaßte ich mich intensiv mit der geologischen Geschichte des Mittelmeerraumes, und brachte meine Freunde in der JOIDES-Arbeitsgemeinschaft dazu, auch hier einige Bohrungen vorzunehmen. Diese führten zu der sensationellen Entdeckung, daß das Mittelmeer vor 5 Millionen Jahren eine riesige Salzwüste war – drei Kilometer unter dem heutigen Meeresspiegel.

Das Vorhaben im Mittelmeer machte tiefen Eindruck auf mich. Ich begann erstmals den Aktualismus Lyells in Frage zu stellen, der für mich bisher die Grundvoraussetzung meiner Wissenschaft war. Lyell konnte nicht recht gehabt haben. Die Bedingungen auf der Erdoberfläche konnten nicht stets die gleichen gewesen sein. Vielmehr hatte ein Meer – das Mittelmeer – zur Wüste werden können, die Kalzitkompensationstiefe (CCD) hatte sich ändern können, und die Gründe für all das waren vielleicht drastischer und aufregender als alles, was Lyell sich je hatte vorstellen können.

Unsere Mittelmeerexpedition hat den amerikanischen Nationalfond für wissenschaftliche Forschungen tief beeindruckt, weil die Wissenschaftler an Bord zu 90% Europäer waren. Bis jetzt hatten die Amerikaner alle Rechnungen bezahlt. Wenn aber Ausländer dermaßen an Tiefseebohrungen interessiert waren, dann sollten auch sie ihren Anteil dazugeben. Als die Mittelmeerfahrt abgeschlossen war, fand in Paris eine Pressekonferenz statt. Nachdem ich über unsere jüngsten Entdeckungen berichtet hatte, hielt der Vorsitzende des JOIDES-Exekutivkomitees eine Rede und lud die interessierten ausländischen Regierungen ein, sich an diesem größten, ungeheuer kostenintensiven Forschungsprojekt der Erdwissenschaft zu beteiligen. Frankreich, die Bundesrepublik Deutschland, Großbritannien, Japan und die Sowjetunion nahmen die Aufforderung an. Die JOIDES-Organisation wurde auf eine internationale Basis gestellt, und 1975 begann die «Internationale Phase der Ozeanbohrung» (*International Phase of Ocean Drilling*, abgekürzt: IPOD).

Ich gab mir alle Mühe, auch die Schweiz zur Mitarbeit zu bewegen, doch die internationale Wissenschaftspolitik machte alle meine Bemühungen zunichte. Immerhin aber brachte ich es fertig, den Vorschlag zu einer Bohrungskampagne durchzusetzen, um die CCD an einer Stelle im Südatlantik zu erforschen, wo wir unter den weißen Schlämmen des rezenten Meeresbodens ganz unerwartet rötliche Tone gefunden hatten.

Als 1975 die IPOD begann, unterbreitete ich dem Planungsausschuß der JOIDES-Organisation den brieflichen Vorschlag, eine Reihe von Bohrungen an der Ostflanke des Mittelatlantischen Rückens durchzuführen, und zwar entlang 30 Grad südlicher Breite, um dort die augenfällige Anhebung der CCD während des Miozäns, also vor etwa 10 Millionen Jahren, zu untersuchen. Zwei alternative Hypothesen standen zur Diskussion: Die

«Nachschübler» behaupteten, in diesem Teil des Atlantiks sei während des Miozäns die Nachschubproduktion des Planktons drastisch reduziert worden. Ihre Gegner, die «Bedarfler», nahmen dagegen eine plötzliche Zufuhr von kaltem, korrosivem Tiefseewasser an, so daß mehr kalziumhaltige Schlämme aufgelöst und abgetragen worden seien, als es Nachschub gegeben habe. Wir brauchten also Zahlen über die Vermehrung des Planktons, und vor allem benötigten wir Informationen über die Chemie am Meeresboden, um die Streitfrage zu beantworten. Der Südatlantik war das geeigneteste Gebiet, um sich Daten dieser Art zu beschaffen.

Für die Wissenschaft war dieses Problem durchaus von Bedeutung, und die Bohrstelle war gut ausgewählt. Auf der Grundlage meines Vorschlages von 1975 wurde für 1978 eine siebenwöchige Bohrexpedition angesetzt, doch schließlich verschob man sie auf 1980. Deshalb hatten wir alle Zeit der Welt, um diese und zwei weitere Forschungsfahrten in den Südatlantik vorzubereiten.

Aufschübe sind frustrierend für Wissenschaftler, allerdings bringen sie auch oft unerwartete Vorteile. Einer davon war die Gelegenheit, sich die modernste Technologie zunutze zu machen.

Zwar hatte man, ausgehend von den Streifen der Ozeankruste, die an der Achse der Meeresboden-Ausdehnung begannen, den «Strichcode» des remanenten Magnetismus erarbeitet, doch hatte man die Magnetostratigraphie noch nie auf die Sequenz von Sedimenten angewandt, von denen man im Ozean Proben nur mit Hilfe von Kernbohrungen entnehmen kann. Tiefseebohrkerne aus den ersten zehn Jahren des Projektes waren dazu kaum geeignet, weil die rotierenden Bohrer das Probenmaterial beschädigt hatten. Außerdem barg man nur selten das gesamte Material, und doch ist gerade ein lückenloser Befund für eine komplette Liste der Polumkehrungen unverzichtbar. Doch wir glaubten, das müsse so sein.

Nicht selten aber haben wir Naturforscher keine Ahnung, wozu Ingenieure fähig sind. Nun gut – wir gaben uns mit mangelhaften Bohrkernen zufrieden, und deshalb merkten die Ingenieure des Tiefsee-Bohrprojektes nicht, daß dort ein Problem entstanden war. Stan Serucki, einer meiner früheren Kollegen von Shell, hatte schon fast zehn Jahre für unser Projekt gearbeitet, bevor er durch Zufall bemerkte, daß wir zum Zwecke der präzisen Datierung unzerstörtes Kernprobenmaterial benötigten. Das rein technische Problem dabei erwies sich als ziemlich leicht lösbar. Statt der herkömmlichen Praxis, mit einem rotierenden Bohrsatz einen langen Kern aus dem Meeresboden zu bohren, entwickelte Serucki den hydraulischen Kolbenbohrer. Dessen Wirkweise besteht darin, daß durch den rotierenden Bohrkopf eine nicht rotierende Trommel mit hydraulischem Druck in den Meeresboden gepreßt wird und den Kern aufnimmt. Diese neuartige Bohrtechnik zerstört die Probe nicht und garantiert zudem die Vollständigkeit des Kernmaterials.

Als ich im Sommer 1979 in China war, erhielt ich einen Brief von Jim Hays aus Lamont. Er hatte den neuen Bohrzylinder mit Erfolg im Golf von

Kalifornien eingesetzt und war von den Resultaten restlos begeistert. «Nach der Erfindung, ein Bohrschiff dynamisch in Position zu halten», so schrieb er, «ist der hydraulische Kolbenbohrer das größte Geschenk für Gelehrte, die sich mit der Geschichte der Ozeane befassen». Jetzt erst war es uns möglich, die notwendige Präzision zu erzielen, um auch Ereignisse von – erdgeschichtlich betrachtet – kurzer Dauer zu erfassen. Anstatt in Jahrmillionen zu rechnen und sich dabei auf Daten zu stützen, die aus zermahlenen und unvollständigen Kernen stammten, konnten wir nun Geschehnisse rekonstruieren, die sich in Sedimenten widerspiegeln, welche in nicht mehr als 100 oder 1000 Jahren entstanden waren. Hays erwartete von seinen Kollegen Unterstützung. Sie sollten das normale Bohrprojekt unterbrechen und eine ganz spezielle Expedition unternehmen, um das neue Gerät zu erproben. Dies verursachte einen weiteren Aufschub meiner Atlantik-Bohrexpedition. Doch Hays hatte recht. Lieber wollte ich später mit meiner Arbeit beginnen, sie dafür dann aber besser tun. Wir sollten dem neuen Kolbenbohrer eine Chance geben.

Die Erfindung des neuen Kolbenbohrers gab auch dem Tiefsee-Bohrprojekt neue Impulse, so daß die internationale Phase bis 1983 ausgedehnt wurde. Ich erfuhr nach meiner Rückkehr aus China während unserer ersten Planungssitzung, daß man unseren Auftrag verlängert hatte. Nunmehr planten wir für fünf, nicht mehr nur für drei Bohrexpeditionen in den Südatlantik. Eine ganze Bohr-Kreuzfahrt diente ausschließlich dem Zweck, den Mittelatlantischen Rücken anzubohren. Um das Alter der Sedimente genau bestimmen zu können, sollte dabei, wann immer möglich, der hydraulische Kolbenbohrer verwendet werden. Für Leg 73 des DSDP wählten wir vorrangig sieben Bohrstellen aus.

Ich bestieg die *Glomar Challenger* in Santos, Brasilien, um zum fünften Male auf diesem Schiff meinen Dienst anzutreten. Ein junger Spezialist für magnetische Anomalien des Meeresbodens, John LaBrecque aus Lamont, hatte zusammen mit mir die wissenschaftliche Leitung der Expedition. Außerdem waren drei alte Freunde – Max Carman von der Universität Houston, Steve Percival von der Mobil-Ölgesellschaft, Ramil Wright von der Universität Florida und zwei frühere Studenten (Judy McKenzie und Helmut Weisert) als Wissenschaftler an Bord. Kollegen aus Großbritannien, Frankreich und Deutschland verstärkten das amerikanisch-schweizerische Kontingent.

Das Bohrschiff lief am 13. April 1980 aus, kurz bevor mein Aufsatz über die endkreidezeitliche Katastrophe in der Zeitschrift *Nature* erscheinen sollte. Zehn Tage Seefahrt, bevor wir planmäßig unsere erste Bohrstelle erreichten, gaben uns jede Menge Gelegenheit, unser jüngstes Projekt zu diskutieren. Ich hatte ein Exemplar der Druckfahnen meines Artikels mitgebracht. Auf unserer langen Reise zu unserer ersten Bohrstelle gab ich mir alle Mühe, meinen Kollegen meine Faszination zu vermitteln, sie ebenso für die Frage des Massenaussterbens am Ende der Kreidezeit zu interessieren, wie ich selbst daran interessiert war, und ihnen klarzumachen, warum das Thema gerade auch für unsere unmittelbar bevorstehenden Forschungen von so großer Bedeutung war.

Mein ursprünglicher Vorschlag von 1975 hatte eine Untersuchung der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär nicht vorgesehen. Ich hatte seinerzeit deren Bedeutung noch gar nicht erkannt und mich ausschließlich auf das Auf und Nieder der CCD während des Miozäns konzentriert. Daß diese Kompensationslinie, wie Thomas Worsley feststellte, am Ende der Kreidezeit eine so verblüffende Anhebung erfuhr, hatte ich in meine Überlegungen nicht einbezogen. Nachdem aber unser Auftrag verlängert worden war, hatten wir vorgeschlagen, das gesamte Känozoikum zu untersuchen – mit anderen Worten: die gesamte erdgeschichtliche Neuzeit bis zur Grenze der Kreidezeit. Allerdings spielte der Kreide-Tertiär-Grenzbereich selbst in unserem Bohrplan noch keine Rolle. Isabella Premoli-Silva hatte zwar vorgeschlagen, sich auch dieses Grenzbereiches anzunehmen, war jedoch damit nicht durchgedrungen.

Daß man so wenig Begeisterung dafür an den Tag legte, war darauf zurückzuführen, daß es bei Tiefseekernbohrungen noch nie gelungen war, Bohrkerne mit zusammenhängenden, ungestörten Schichtenfolgen aus dem Grenzbereich zwischen Kreidezeit und Tertiär zu bergen. Gewiß – zweimal hatten wir diesen Grenzbereich sogar durchstoßen, doch unsere Paläontologen hatten uns erklärt, dort, wo eigentlich die Grenze sein sollte, sei einfach nichts zu finden. Dies hörten wir immer und immer wieder auf allen folgenden Bohrexpeditionen. Aus irgendwelchen Gründen fehlte immer entweder der jüngste Abschnitt aus der Kreidezeit oder der älteste aus dem Tertiär, wenn nicht gar beide. Entweder waren die Schichtenfolgen durcheinander geraten und zerstört, nur unvollständig geborgen oder einfach nicht greifbar, weil wir versäumt hatten, dem betreffenden Abschnitt Kerne zu entnehmen.

Auch die Erfindung des neuen Bohrzylinders schürte keinen großen Optimismus, denn der Bohrzylinder durchschlägt nicht jedes Gestein und kann auch nicht unterhalb von 250 Metern Tiefe eingesetzt werden. Doch die endkreidezeitlichen Sedimente, die vor 65 Millionen Jahren abgelagert worden waren, liegen gewöhnlich 500, wenn nicht gar 1000 Meter unter dem Meeresboden. In aller Regel sind sie einerseits zu kompakt und liegen andererseits zu tief, so daß der hydraulische Kolbenbohrer kaum bis zu ihnen vordringt.

Mein eigener Optimismus allerdings hatte – noch bevor ich an Bord der *Glomar Challenger* ging – durch die Bemerkungen eines Kollegen Auftrieb bekommen. Es war während der letzten Planungssitzungen im Februar: Dieter Fütterer aus Kiel gab einen kurzen Bericht über einige Forschungen, die er und sein Team im Sommer zuvor an Bord des Forschungsschiffes *Jean Charrot* durchgeführt hatten. Mehr oder weniger nebenbei erwähnte er, er sei mit dem üblichen Kolbenbohrer in ein Sediment paläozänen Alters vorgedrungen, und zwar im Kapbecken westlich von Kapstadt, nicht weit von einer Stelle, an der auch wir eine Bohrung vorgesehen hatten.

Das Paläozän ist die früheste Epoche des 65 Millionen Jahre andauernden Känozoikums, dessen erste 10 Millionen Jahre es umfaßte. Sedimente solchen Alters sind gewöhnlich unter Hunderten von Metern jüngerer Abla-

gerungen begraben. Doch nun berichtete Fütterer, daß an einer ganz bestimmten Stelle die paläozoischen Ablagerungen unmittelbar unter dem heutigen Meeresboden greifbar seien. Und ihre Kontaktstelle mit den Sedimenten der Kreidezeit konnte nicht sehr viel tiefer liegen – vielleicht nur 100 oder 200 Meter unter dem heutigen Meeresboden und damit durchaus in Reichweite des hydraulischen Kolbenbohrers. Es wäre natürlich ein großer Glücksfall, wenn wir mit Hilfe des neuen Bohrverfahrens Proben von jenseits der Grenze Kreide-Tertiär finden würden.

Meine Kollegen an Bord waren von meinen Überlegungen sehr angetan, doch was die Prioritäten anging, rangierte die Bohrstelle bei Kapstadt erst an dritter Stelle, und die vorrangig eingestuften Vorhaben mußten natürlich zuerst ausgeführt werden. Deshalb trieben wir, wie es ursprünglich geplant war, vom 23. April bis zum 19. Mai fünf Bohrlöcher in die Ostflanke des Mittelatlantischen Rückens, um uns ein Profil von dessen geologischer Beschaffenheit zu verschaffen. Wir hatten Glück. Das Wetter war gut, die Arbeiten verliefen störungsfrei, und wir begingen nur wenige Fehler, die Zeit kosteten. Unsere Arbeit war fast schon getan; wir befanden uns bereits auf halbem Wege in den Südatlantik. Die ersten Bohrungsresultate lagen vor. Sie hatten ergeben, daß wir unsere Bohrlöcher zu dicht beieinander angesetzt hatten. Daher ließen wir nach Beendigung der ersten vier Bohrungen das fünfte Bohrloch des vorgesehenen Profils aus und begannen sofort die Arbeit am sechsten.

Nach unserem Zeitplan sollten wir am 1. Juni in Kapstadt anlegen. Doch wir hätten nach der Fertigstellung des sechsten Bohrlochs noch genügend Zeit gehabt, um zur siebten Bohrstelle zu fahren und eine weitere Bohrung zu beginnen. Die Alternative dazu war, statt dessen direkt das Kapbecken anzusteuern, wo wir möglicherweise mit Hilfe des hydraulischen Kolbenbohrers die Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär durchstoßen könnten.

Am Morgen des 19. Mai rief ich unsere Wissenschaftler zusammen. Wir standen um unseren Arbeitstisch und berieten uns. Was auf dem Spiel stand, war klar – es ging darum, eine Bohrung, die zunächst erste Priorität gehabt hatte, zugunsten einer anderen Bohrung aufzugeben, die nach dem ursprünglichen Plan nur drittrangig gewesen war. Andererseits hatten wir freie Hand, während unserer Kreuzfahrt unsere Entscheidungen zu ändern. Wir entschieden uns für den Versuch im Kapbecken. Also formulierten wir ein Telegramm an den wissenschaftlichen Leiter des Projektes in San Diego und erbaten die Erlaubnis, im Kapbecken zu bohren. Während wir noch auf die Antwort warteten, änderten wir bereits unseren Kurs in Richtung auf die neue Bohrstelle.

Unser neues Ziel, Bohrstelle 524, lag etwa 1000 Kilometer westlich von Kapstadt. Wir trafen am Abend des 21. Mai dort ein – und befanden uns sofort mitten in einer Pechsträhne. Weil unsere Techniker ein neues Geräteteil auszuprobieren wünschten, wurde der Beginn der Bohrungen zunächst einmal verschoben. Doch der Versuch erwies sich als totales Fiasko. Der Ingenieur, der ihn vornahm, hatte sich nicht mit den Bohrtechnikern abgestimmt

und so ein zylindrisches Instrument entwickelt, dessen Durchmesser genau so groß war wie der innere Durchmesser des Bohrkopfes. Deshalb klemmte der Zylinder beim Hinabpumpen und blieb im Bohrkopf stecken. Mit anderen Worten: Der Test mißglückte. Noch schlimmer ist die Tatsache, daß keine weitere Bohrung möglich war. Unseren Arbeitern blieb nichts anderes übrig, als das gesamte, 4000 Meter lange Bohrgestänge wieder nach oben zu ziehen, um den blockierten Bohrkopf zu entfernen, bevor sie ein neues Bohrgestänge mit entsprechendem Kopf für die Kernproben zum Einsatz bringen konnten. Dies alles bedeutete einen Zeitverlust von 24 Stunden.

Schließlich begann die Operation mit dem hydraulischen Kolbenbohrer mittags am 23. Mai. Wie wir nach Fütterers Bericht erwartet hatten, stießen wir sehr rasch auf Sedimente aus dem Paläozän, doch bald schon gab es eine neue Enttäuschung. In einer Tiefe von etwa 30 Metern stießen wir auf Feuerstein, jenen harten Fels, der aus den zementierten Skeletten von *Radiolarien* (Strahlentierchen) besteht, und der Kolbenbohrer drang durch diese harte Gesteinsschicht nicht durch. Wir blieben sozusagen im Paläozän stecken.

In der Hoffnung, mit unserem normalen Kernbohrer dennoch der ersehnten Grenzzone Proben entnehmen zu können, mußten wir noch einmal ganz von vorn beginnen und benutzten nun nur noch den rotierenden Bohrkopf, um die harte Schicht zu durchdringen. Allerdings gewannen wir damit oft nur Proben mit unvollständiger und zerstörter Schichtreihe.

Während wir mitten in der Arbeit waren, tauchte der Kapitän im Kernlaboratorium auf. Er brachte schlechte Nachrichten: Nachdem wir soeben erst bei ruhiger See kostbare Stunden wegen eines dummen Konstruktionsfehlers vergeudet hatten, begann Neptun sich nun zu ärgern und sandte entsprechend hohen Seegang. Eine heraufziehende Gewitterfront bedrohte uns, deren Ankunft am folgenden Morgen um 6 Uhr erwartet wurde. Der Kapitän drängte uns, die Bohrarbeiten zu beschleunigen. Ein Bohrgestänge, das nicht sehr tief in den Meeresboden eingedrungen sei, könne außerordentlich empfindlich sein und nur allzu leicht brechen. Wir hätten eine größere Chance, Schaden zu vermeiden, wenn die Bohrstange bei Beginn des Sturmes tiefer in ozeanische Sedimente versenkt wäre, meinte der Kapitän. Auch wir wollten ja rascher bohren, doch gab es dafür technische Grenzen. Aber glücklicherweise kam überhaupt kein Sturm. Die Front wandte sich abrupt nach Osten, nachdem sie von Süden her bis auf 100 Kilometer an unser Schiff herangerückt war.

Am nächsten Tag, dem 24. Mai, hatten wir gutes Wetter. Alle zwei Stunden wurde ein neuer Bohrkern an Bord gehievt. Tiefer und tiefer fraß sich die Bohrstange in den Meeresboden. Die Kerne waren relativ unversehrt, obwohl wir uns des rotierenden Bohrkopfs bedienten. Auch die Ausbeute war gut: Fast jedesmal, wenn der Behälter mit dem Probenmaterial an Bord gehievt wurde, fanden wir eine nahezu volle Trommel von Probenmaterial.

Kaum an Bord, wurden die Proben auch schon untersucht. Die Paläontologen machten sich über die *Foraminiferen* und das Nannoplankton her, und die Geophysiker nahmen ihre Magnetometer in Betrieb, um bei jeder Probe die Polarität des remanenten Magnetismus zu untersuchen.

Nannoplankton-Assemblagen sind in ozeanischen Sedimenten unterschiedlichen Alters sehr verschieden. Auf dieser Basis teilt man sie in Dynastien ein, die man als «Zonen» bezeichnet. Im Känozoikum gibt es etwa 50 derartige «Zonen» von Nannofossilien. Wie man die Dynastien der ägyptischen Pharaonen mit durchlaufenden Nummern versehen hat, so auch die Zonen der Nannofossilien.

Die oberen Sedimente des Känozoikums an unserer Bohrstelle sind durch Erosion abgetragen worden. Die erste Zone, der wir Bohrkerne entnahmen, war «paläogen», eine Bezeichnung, die sich auf die erste, ältere Hälfte des Känozoikums bezieht. Die Nannoplankton-Assemblagen wurden als «Nannofossil-Paläogen 13» (abgekürzt: NP 13) identifiziert. Unser Ziel war «NP 1», die erste oder unterste paläogene Zone, unmittelbar über dem Grenzbereich zur Kreide. Rasch durchbohrten wir die Zonen 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4 und waren am Mittag des 24. Mai mitten in der Zone «NP 3», als der Kern Nr. 13 aus dem neuen Bohrloch nach oben kam. Wir waren nicht mehr weit vom Ziel. Ungeduldig warteten wir auf den Bohrkern, der unter den Sedimenten von «NP 1» die Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär durchqueren sollte.

Inzwischen lagen für die Proben die magnetometrischen Altersangaben vor. Wir waren über Chron C-24-N, C-24-R, C-25-N, C-25-R, C-26-N sowie C-26-R hinaus und waren auf Chron C-27-N gestoßen, das der paläontologischen Epoche «NP 3» entsprach. Die Grenze lag innerhalb der uns nun schon hinlänglich bekannten Epoche Chron C-29-R.

Die Sedimente der Zone «NP 3» erwiesen sich als ungewöhnlich dick. Den ganzen Nachmittag über fand der Nannoplankton-Spezialist Percival buchstäblich nichts. Jeweils eine Stunde, nachdem ein neuer Kern heraufgekommen war, schrieb er mit Kreide «Nannofossil-Paläogen 3» auf die Wandtafel unseres Labors, auf der er sämtliche Eingänge notierte. Nachdem er dies vier- bis fünfmal wiederholt hatte, begannen wir ihn aufzuziehen und änderten die Eintragung in «Nichts Neues, Percival 3».

Bis neun Uhr abends hatte Percival noch keinerlei Fossilien in der Zone «NP 2» identifiziert, als der Kapitän abermals erschien. Die Wettervorhersage war entmutigend. Am nächsten Morgen stand ein neues Sturmtief zu erwarten. Der Kapitän warnte uns: Um einen Bruch des Gestänges zu vermeiden, sollten wir die Rohre aus dem Bohrloch ziehen, bevor die Wetterfront käme. Nun begann ein Wettrennen zwischen dem langsam mahlenden Bohrer und dem rasch nahenden Tief. Konnten wir «NP 1» durchdringen und in «C-29-R» vorstoßen, bevor der Sturm kam? Würde es uns glücken, einen Bohrkern zu bergen, der von jenseits der Grenze stammte?

Voller Ungeduld und Besorgnis warteten wir. Fröhlich um ein Uhr am 25. Mai teilte mir Percival mit, Kern 19, der einige Stunden zuvor an Bord gehievt worden war, enthielte kreidezeitliche Nannofossilien.

«Doch wie steht es mit den Nannofossilien der Zone «NP 1»? Wir haben ja die Zone «NP 1» noch gar nicht erreicht!»

«Es gibt keine «NP-1»-Fossilien», erwiderte Percival.

Wir alle waren sehr enttäuscht. Mitternacht war längst vorüber, und das Sturmtief kam immer näher. Zu mutlos, der bevorstehenden Krise ins Auge zu sehen, bat ich John LaBrecque (der zusammen mit mir die wissenschaftliche Leitung des Unternehmens hatte), für mich die Aufsicht zu übernehmen. Ich selbst legte mich schlafen.

Als ich aufwachte, begrüßte mich ein strahlender Morgen mit Sonnenschein und makellos blauem Himmel. Der Sturm war ausgeblieben. Wie das Sturmtief zuvor war er nach Osten abgewandert – diesmal allerdings erst, nachdem er sich unserer Bohrstelle bis auf 50 Kilometer genähert hatte.

Ich ging zum Kernlabor. Percival sagte mir, ich solle selbst nachsehen, wie es um die Kontakte zwischen den Nannofossilien der Zone «NP 2» und dem obersten Kreidehorizont im Kern 19 stand. Er hatte keine der frühtertiären Nannoplanktonarten gefunden. In der Schichtenabfolge mußte es eine Lücke geben, dachte Percival. Er meinte, daß dort, wo eigentlich die Grenzsedimente hätten sein sollen, das Material durch Erosion abgetragen worden sei.

Ich stand vor dem Kern und untersuchte die Schnittfläche mit dem Vergrößerungsglas. Tiefseesedimente, die aus Material bestehen, das von oben herab auf den Meeresboden fällt, lassen sich mit Schneeschichten an Land vergleichen. Bei schmutziger Luft entsteht oft eine Art Laminierung: Dünner Schnee und Schmutzschichten wechseln miteinander ab. Das älteste tertiäre Sediment in unserem Kern zeigte die gleiche Schichtungsstruktur. Ich konnte papierdünne Schichten von leicht unterschiedlicher Zusammensetzung feststellen. Hätte tatsächlich eine Erosion stattgefunden, dann wären diese regelmäßigen Schichten zerstört worden. Doch einen derartigen Erosionshorizont gab es nicht, jedenfalls konnte ich ihn nicht finden. Außerdem ergab die Annahme einer Lücke für mich keinen Sinn. Das Kapbecken, wo wir unsere Bohrungen durchführten, führt seinen Namen auf die Tatsache zurück, daß es eine Senke ist. Sedimente auf flachen Kontinentalsockeln oder auf unterseeischen «Gebirgskämmen» können durch Bodenströmungen abgetragen werden, doch wohin sollten die Sedimente in einem Becken gespült werden? In einem solchen Becken war eher eine Schichtreihe von ungewöhnlicher Mächtigkeit zu erwarten als eine Schichtlücke. Tatsächlich waren auch alle anderen Sedimente des Paläozäns in dieser Bohrstelle, wie beispielsweise das sehr mächtige «NP 3», sehr reichlich vertreten. Und nun sagte mir Percival, daß die frühesten paläozänen Sedimente ganz und gar fehlten. Es konnte nicht stimmen!

Percival hatte die ganze Nacht, in der nach Kern Nr. 19 drei weitere Bohrkerne an Bord gehievt wurden, nicht geschlafen. Nun zog er sich in seine Kabine zurück, um sich auszuruhen. Als ich in seinem Laboratorium allein war, ging ich seine Notizen durch. Kern 20 war um 3.30 Uhr angekommen, Kern Nr. 21 um 5.30 Uhr und Kern Nr. 22 um 7.30 morgens. Percival hatte sie nur flüchtig untersucht. In allen von ihnen fand er reichlich Nannofossilien aus der Kreidezeit, abgesehen von der oberen Hälfte von Kern 20. Materialproben aus den oberen drei Metern dieses Kerns schienen keine

Nannofossilien zu enthalten. Jedenfalls hatte Percival in seine Kladde notiert: «Nach flüchtiger Untersuchung ohne Nannofossilien.»

Dies war wirklich seltsam. Überall sonst auf unserem Erdball hatten bis unmittelbar zum Ende der Kreidezeit fossile Organismen gelebt, und nur die ersten paläogenen Sedimente direkt an der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär waren frei von Fossilien. Im übrigen war der «Grenzton» nur ein paar Millimeter oder allerhöchstens ein paar Zentimeter dick. Es ergab keinen Sinn, unter den jüngsten kreidezeitlichen Sedimenten eine drei Meter dicke Zwischenschicht zu finden. Hatte Percival in seiner Eile und seiner Übermüdung in den frühen Morgenstunden einen Fehler begangen?

Doch auf Percival war stets Verlaß gewesen. Wir hatten schon auf der «Leg 3» genannten Bohrkreuzfahrt zusammengearbeitet, die unsere erste gemeinsame Kreuzfahrt gewesen war. Als ich später eine Bohrexpedition zum Schwarzen Meer geplant hatte, hatte ich ihn ausgewählt, als Mikropaläontologe an Bord tätig zu sein. 1975 hatten wir zudem eine Zeit gemeinsam auf der *Glomar Challenger* verbracht. Percival beeindruckte mich durch seine harte Arbeit, seine Bereitschaft zur Kooperation und sein stets freundliches Wesen. Oft arbeitete er 36 bis 48 Stunden hintereinander und gönnte sich keinen Schlaf. Als man mich daher fragte, wer an der «Leg-73»-Bohrexpedition teilnehmen sollte, hatte ich zum dritten Male darum gebeten, seine Hilfe in Anspruch nehmen zu dürfen. In ihn setzte ich absolutes Vertrauen.

Während ich mir noch den Kopf zerbrach, tauchte Percival nach einem kurzen Nickerchen wieder im Labor auf. Um 9.30 Uhr kam Bohrkern 23 herauf. Ich trat zu Percival, nachdem er seine Routineuntersuchung beendet hatte, und fragte nach dem Zwischenstück ohne Fossilien.

Nein, er war gar nicht so sicher, ob es ganz ohne Fossilien wäre. Es sei spät gewesen – oder genauer: sehr früh am Morgen. Er habe sich zu dieser Zeit nicht allzuviel Mühe gegeben, in den tonigen Sedimenten nach winzigen Nannofossilien zu suchen. Nun aber habe er geschlafen und fühle sich in der Lage, die Proben noch einmal genauer zu untersuchen.

Ich ließ Percival in Ruhe arbeiten und ging zur Brücke hinauf, um mit unserem «Wetterfrosch» zu schwatzen – dem Meteorologen, dessen vom Computer ausgedruckte Satellitenbilder uns vor den Stürmen warnten, die Ende Mai auf der Südhalbkugel den Winter einleiten.

Unser Gespräch wurde durch eine Durchsage unterbrochen, die über den Bordlautsprecher kam. Percival erwartete mich in seinem Labor. Ich rannte sofort los und fand Percival, der über das ganze Gesicht strahlte. Er hatte in dem scheinbar fossilienfreien Probenmaterial Fossilien gefunden, darunter die frühesten tertiären Nannofossilien. Nun glaubte er, die kreidezeitlichen Nannofossilien im Kern Nr. 19 seien gewissermaßen eine «Neuaufgabe» – Fossilien, die ursprünglich aus einem kreidezeitlichen Sediment stammten, dann aber erneut in einem frühtertiären Sediment abgelagert worden waren. Die Grenze verlief nicht im Kern 19, sondern mitten durch den Kern 20; von einer Unterbrechung der Schichtenfolge durch eine Ero-

sionslücke konnte also keine Rede sein. Vielmehr gab es eine ungestörte Kontinuität von der jüngsten Kreidezeit bis zum frühesten Tertiär.

Es war, als wenn wir auf Gold gestoßen wären. Die ersten drei Segmente von Kern 20 der Tiefseebohrstelle 524 wurden schließlich zu einer der am gründlichsten erforschten Sektionen unserer Tiefsee-Bohrkerne. Die paläozänen Sedimente im Kapbecken wiesen die ungewöhnlich hohe Ablagerungsrate von etwa 3 Zentimetern pro Jahrtausend auf. Der bei Gubbio nur weniger als einen Zentimeter dicke «Grenzton» ist hier um ein Vielfaches stärker. Die früheste paläogene Nannofossilienzone «NP 1» ist mehr als drei Meter mächtig und bietet so eine hervorragende Gelegenheit, über die kreidezeitlich-tertiäre Grenze hinweg biologische Veränderungen zu untersuchen.

Percival bestimmte die Nannoplankton-Assemblagen in Proben, die nur wenige Zentimeter auseinanderlagen und lediglich Zeitintervalle von tausend Jahren oder weniger repräsentierten. Meine Züricher Kollegin, Käthi Perch-Nielsen, tat dasselbe. Dick Poore vom Geologischen Forschungsdienst der USA und Jan Smit aus Amsterdam nahmen sich der *Foraminiferen* an. Auf den ersten Blick schien das gleiche Massensterben des kreidezeitlichen Nannoplanktons und der *Foraminiferen* wie überall stattgefunden zu haben, und zwar ebenso plötzlich und ohne Vorwarnung. Über dem Aussterbenshorizont lag ein «Grenzton» fast ohne Fossilien. Dann kamen die Arten aus dem Tertiär: zuerst Phyto- und Zooplankton in nur wenigen Varietäten und nur vereinzelt Exemplaren. Dieses spärliche Vorkommen der Fossilien war der Grund gewesen, weshalb Percival in den dunklen Stunden vor der Morgendämmerung nichts im Mikroskop gesehen hatte, als er das obere Segment von Kern 20 betrachtete.

Bevor ich die Chance hatte, mich in die neuen Daten zu vertiefen, hatte ich ein sehr simples Bild von der Veränderung im Fossiliengehalt an der Grenze zwischen Kreide und Tertiär gehabt. Man hatte mir gesagt, wenn man den «Grenzton» bei Gubbio untersuchte, sei die «Naht-» oder Kontaktstelle zwischen Kreide und Tertiär so schmal wie die Schneide eines Messers. Doch was in Gubbio und im dänischen «Fischton» eine rasiermesserdünne Grenze war, war im Kern 20 eine mehrere Meter dicke Übergangszone. So erhielten wir hier die ersten detaillierten Informationen darüber, was sich vor 65 Millionen Jahren tatsächlich ereignet hatte. Percival war auf die ersten kreidezeitlichen Nannofossilien im unteren Abschnitt des Kerns 19 gestoßen, der jedoch gar nicht kreidezeitlich war. Und doch hatte er sich nicht geirrt. In derselben Probe hatte er jedoch auch Arten aus dem Tertiär entdeckt. Wenn aber nun das schichtmäßig oberste Vorkommen einer kreidezeitlichen Art die Grenze markierte, so wäre sie schon durch den Kern 19 verlaufen, wie Percival ursprünglich angenommen hatte. Gewöhnlich aber verlegt man die Grenze dorthin, wo die ersten tertiären Arten auftauchen. Dieser Horizont liegt allerdings – wie Percival und Frau Perch-Nielsen schließlich feststellten – sehr viel tiefer, nämlich etwa 4,05 Meter unter dem obersten Rand von

Bohrkern 20. Mit anderen Worten: Es gibt ein Intervall von etwa 4 Metern Umfang oberhalb der Grenze zwischen Kreidezeit und Tertiär, wo kreidezeitliche und tertiäre Fossilien nebeneinander gefunden wurden, wobei der prozentuale Anteil der alten, kreidezeitlichen Arten nach oben hin beständig abnimmt. Handelte es sich dabei etwa um Überlebende der monatelangen Finsternis, die auf ihre Weise davon Zeugnis ablegten, daß die Dunkelheit allein nicht genügte, um die Ausrottung des kreidezeitlichen Planktons zu bewirken?

Als ich mit Percival und später mit anderen Experten diskutierte, wurde mir bewußt, daß sie das Vorhandensein einer solchen Übergangszone gar nicht so sehr überraschte, abgesehen davon, daß diese Zone im Kapbecken ungewöhnlich dicke Sedimente hinterlassen hatte. Die Experten waren bereits überall auf eine solche Zone gestoßen. Für mich war das freilich neu, und ich bat um Aufklärung.

Nannofossilien sind so winzig, erklärte Percival, daß sie durch die geringste Strömung des Grundwassers hin und her bewegt werden. Sehr zu meiner Enttäuschung hatte er den Eindruck, daß es sich bei den kreidezeitlichen Fossilien um Skelette (bzw. «Panzer») von Organismen handelte, die vor dem Beginn des Tertiärs gelebt hatten. Deren Skelette seien während der frühesten Tertiärzeit zusammen mit tertiären Fossilien abgelagert worden.

Hans Thierstein vom Scripps-Institut machte Organismen, die sich in den Meeresboden eingraben, für diese Vermischung der Fossilien unterschiedlicher Epochen verantwortlich. Er hatte oberhalb der kreidezeitlich-tertiären Grenze liegende Sedimente an einer Tiefsee-Bohrstelle im Westatlantik untersucht, wo sich Würmer und andere Lebewesen durch die Ablagerungen gegraben hatten. So war nach Thiersteins Auffassung eine Vermischung der ältesten tertiären und der jüngsten kreidezeitlichen Sedimente unvermeidlich.

Wir fanden in unseren Grenzsichten keine Spuren von Organismen, die sich eingegraben hatten. Die Feinstruktur der dünnen Sedimente oberhalb der Grenze war gut erhalten. Doch blieb dennoch als dritte Möglichkeit offen, daß die Bodenströmungen eine Mischung von älteren und jüngeren Skeletten verursacht haben. Wie konnten wir die Skelette von Organismen, die bei dem Massenaussterben in der Endkreidezeit zugrundegegangen waren, von denen jener Lebewesen unterscheiden, die vielleicht als Nachkommen der Überlebenden in den Ozeanen des frühesten Tertiärs gelebt hatten? Um diese Frage zu beantworten, benötigten wir wieder die Hilfe der Chemie.

Die Chemie der fossilen Meerestiere und -pflanzen ändert sich, wenn sich die Chemie der Ozeane selbst ändert. Geht man an den Strand, um Muscheln zu sammeln, so sehen die aus der Zeit vor 1945 genauso aus wie spätere. Doch die Muscheln des Atomzeitalters – also nach 1945 – unterscheiden sich von älteren Exemplaren durch ihren Gehalt an Strontium-90, jenes radioaktiven Isotops, das ab 1945 (nach dem Abwurf der ersten Atombomben und nach den späteren Atombombentests) die Ozeane verseuchte. Muscheln,

Knochen und Zähne von Organismen aus der Zeit nach 1945 tragen – im Gegensatz zu den nichtradioaktiven der Zeit vor der Bombe – das Stigma dieses radioaktiven Isotops.

Auch Planktonfossilien aus der Epoche vor der endkreidezeitlichen Katastrophe haben eine andere Isotopenzusammensetzung als solche nach dem Ende der Kreidezeit. Beispielsweise veränderte der Anstieg der Meerestemperatur um 5 Grad, den Shackleton im Grenzbereich festgestellt hatte, für mehrere Jahrtausende nach der Katastrophe das Verhältnis von Sauerstoff 18 zu Sauerstoff 16. Allerdings waren diese Resultate nicht überall nachweisbar und daher für uns keine Hilfe. Die Hilfe kam vielmehr von zwei Geochemikern, J. C. Brennecke und Tom Anderson, die im Jahre 1977 herausgefunden hatten, daß bei den jüngsten kreidezeitlichen und den frühesten tertiären Fossilien auch die anteiligen Verhältnisse der Kohlenstoffisotope unterschiedlich ausgeprägt waren. Mit Hilfe der Kohlenstoffisotopenanalyse lassen sich also fossile Skelette aus der Zeit vor und nach der endkreidezeitlichen Katastrophe unterscheiden.

Unsere Südatlantikexpedition endete am 1. Juni 1980 damit, daß die *Glomar Challenger* in Kapstadt anlegte. Drei Behälter mit Proben gingen per Luftfracht nach Zürich ab. Ich hatte dort mit Qixiang He einen Praktikanten aus der Volksrepublik China, der die Sendungen sofort auspackte und mit Messungen begann. Er schickte ferner Teile mehrerer Proben aus dem Grenzbereich von Kreidezeit und Tertiär an Urs Krähenbühl von der Universität Bern zur Neutronenaktivierungsanalyse.

Nach einem Monat teilte uns Krähenbühl mit, er habe gerade an dem Horizont, wo Percival die Grenze angesetzt hatte, eine Iridiumanomalie gefunden. Auch die ersten tertiären Nannoplanktonarten tauchten in dem gleichen Horizont auf, wo die Iridiumkonzentration plötzlich von der «Hintergrund-Konzentration» von 0,1 Anteil pro Milliarde auf einen Spitzenwert von 3,6 Anteile pro Milliarde emporgeschnellt war. Wie schon die magnetostratigraphischen Untersuchungen unserer Wissenschaftler Lisa Tauxe, Nikolai Peterson und Peter Tucker an Bord gezeigt hatten, lag dieser Horizont innerhalb der Epoche Chron C-29-R. Alles stimmte daher zusammen, abgesehen davon, daß es in den ältesten tertiären Schichten Fossilien mutmaßlich kreidezeitlichen Ursprungs gab. Die Isotopenanalyse sollte entscheiden, ob die Skelette von kreidezeitlichem Nannoplankton stammten, oder ob es sich um tertiäre Abkömmlinge von Arten handelte, die die Katastrophe überlebt hatten. Zwar waren sie, wie der geologische Befund schließlich zeigte, doch zum Aussterben verurteilt, aber möglicherweise hatten sie noch etliche Jahrtausende um ihr Überleben gekämpft.

Ich konnte nicht in Zürich bleiben, um auf die Antwort zu warten. Die Volksrepublik China lud mich zu einer Expedition nach Tibet ein. Gerade hatte ich eine Besichtigungstour des Potalas hinter mir und befand mich im Gästehaus der Regierung in Lhasa, als mich ein Brief meiner Kollegin Judy McKenzie erreichte. Unser Praktikant Qixiang He hatte inzwischen in unse-

rem Isotopenlabor Hunderte von Proben aus dem Südatlantik analysiert. Dabei hatte er sowohl die Sauerstoff- als auch die Kohlenstoffanomalie gefunden, und dies genau im Grenzbereich zwischen den Epochen, wo auch die Iridiumanomalie vorkam. Wir hatten angenommen, der «Grenz-» oder «Fischton» sei in den ersten Jahren des Tertiärs abgelagert worden, denn er enthielt typische Organismen aus dieser Phase. Nun hatte die Isotopenanalyse diese Behauptung bekräftigt. Doch Frau Perch-Nielsen, die die Nannofossilien im «Grenzton» untersuchte, fand, daß ihre Hauptmasse, nämlich 90%, taxonomisch ganz und gar den Organismen in den darunterliegenden Schichten aus der Kreidezeit glich. Sie nahm systematische Auszählungen vor und kam zu dem Ergebnis: Der Prozentsatz der Fossilien, die noch immer kreidezeitlichen Arten angehören, nimmt erst auf einem Niveau ab, das einige Meter oberhalb des «Grenztones» liegt – oder ungefähr 50 000 Jahre nach der Katastrophe, welche die Iridiumanomalie hervorrief.

Die Isotopenchemie ist der «Fingerabdruck», der diese «kreidezeitlichen» Fossilien in den Grenzsichten als Überhänge von Organismenpopulationen auswies, die noch eine Weile in der Übergangsphase nach der Katastrophe im Ozean lebten. Wenn diese Deutung zutrifft, so müssen wir folgern, daß die drei oder vier Monate der Finsternis zum völligen Aussterben nicht ausreichten, sondern daß viele kreidezeitliche Nannoplanktongruppen wieder zum Leben erweckt wurden, als das Sonnenlicht zurückkehrte. Doch irgendwie war eine tiefgreifende Schädigung eingetreten. Die Abkömmlinge der Überlebenden erwartete der Untergang.

Wenn aber das Nannoplankton die Finsternis überlebt hatte, wie stand es da um die *Foraminiferen*? Jan Smit aus Amsterdam führte eine Untersuchung der weltweiten Befunde durch. Zwar stimmte er mit unserer Folgerung überein, daß sich das Aussterben des Nannoplanktons innerhalb von Jahrtausenden abgespielt haben müsse, doch fand er Beweise für ein rascheres Aussterben des Zooplanktons. Beispielsweise ist im spanischen Caravaca die Übergangszone der *Foraminiferen* ganz im Gegensatz zu der meterdicken Übergangszone des Nannoplanktons nur ein paar Zentimeter dick. Die robusteren kreidezeitlichen *Globotruncanen* und *Ruboglobigeriniden* verschwinden, doch kleine und sehr kleine Formen, die in der obersten (jüngsten) Kreide nur sehr selten vorkamen, wurden plötzlich sehr zahlreich. Diese Arten hatten die Katastrophe überlebt, doch auch sie erwartete schließlich das Aussterben. Sogar die letzten dieser winzigsten kreidezeitlichen Arten verschwanden schließlich etwa 10 Zentimeter über der Grenzlinie, also etwa drei- bis viertausend Jahre nach dem Ereignis, das zu der Iridiumanomalie geführt hatte. An die Stelle der letzten kreidezeitlichen *Foraminiferen* traten dann die typischen *Eugubinen* des Tertiärs.

Wie lange dauerte es, bis die Dinosaurier ausgestorben waren? Leigh Van Valen von der Universität Chicago war der Meinung, er habe die letzten Dinosaurier und die ersten känozoischen Säugetiere zusammen gefunden, und zwar in der *Big-Creek-Formation* in Montana. Seiner Schätzung nach

dauerte der Übergang von der Kreide zum Tertiär 50 000 Jahre. Auch Bill Clemens, ein Paläontologe aus Berkeley, war dieser Auffassung. Jan Smit allerdings erhob dagegen Einwände, nachdem er und seine Schüler die Geschichte der Sedimente in der *Big-Creek-Formation* erforscht hatten. Sie fanden Ablagerungen einer ehemaligen Flutebene und den jüngeren Sand eines ehemaligen Flußbettes. Sämtliche Dinosaurierknochen befanden sich in den Schichten der Flutebene, die auch einen besonders iridiumreichen Horizont aufwies. Der Fluß hatte sich dann später in die ältere Flutebene eingefressen. Alle Säugetierknochen fanden sich ausschließlich im Flußsand des ehemaligen Flußbettes. Die holländischen Gelehrten gelangten daher zu der Schlußfolgerung, daß die Dinosaurier ausgestorben waren, bevor diese Säugetiere in Montana einwanderten.

Heinrich Erben von der Universität Bonn, der sich auf Dinosauriereier spezialisiert hat, vertrat die Auffassung, einige Dinosaurier hätten jenes katastrophale Ereignis überlebt, das der Kreidezeit ihr Ende bereitete. In einem Vortrag, den er 1983 in Straßburg hielt, behauptete er, die Dinosauriereier, die er in den obersten (jüngsten) kreidezeitlichen Sedimenten gefunden habe, seien alle normal entwickelt, doch ließen sich fünf «Horizonte mit krankhaften Dinosaurier-Eierschalen» dem Paläozän zuordnen. Erben hat seine Resultate noch nicht im einzelnen veröffentlicht; zweifellos bedarf es jedoch noch vieler weiterer Forschungen, bevor feststeht, ob die Urweltriesen an jenem Schreckenstage starben, da – wie es in der Bibel (*Jesaja* 60,2) heißt – «Finsternis bedeckte die Erde», oder ob sie all diese Schrecknisse nur überlebten, um schließlich ganz allmählich an deren Folgen zugrunde zu gehen.

Während der letzten Jahre konnten sich die meisten Wissenschaftler darauf einigen, daß jenes endkreidezeitliche Ereignis, das das große Massensterben hervorrief, nicht zum sofortigen Aussterben der Arten führte. Dies entbehrt nicht einer gewissen Ironie. Jahrzehntelang verlangte man von den Gelehrten, die eine weltweite Katastrophe für das große Massensterben verantwortlich machten, zu beweisen, daß das Aussterben der Arten plötzlich und rasch vor sich gegangen sei. Nun hat man zwar akzeptiert, daß es eine solche Katastrophe gab, doch stellt sich plötzlich heraus, daß das Sterben gar nicht so rasch vor sich ging. Unsere Aufgabe ist es nun zu erklären, warum das Sterben recht lange dauerte.

Ein Ozean à la Dr. Strangelove

Ich kannte Judy McKenzie seit 1972. Damals war ich ein Jahr lang von der ETH in Zürich freigestellt und lehrte als Gastprofessor am Scripps-Institut für Ozeanographie in La Jolla, Kalifornien. Mein Seminar handelte von der Geologie der Schweizer Alpen – eigentlich nicht unbedingt ein zentrales Thema für Studenten der Ozeanographie. Ein paar Doktoranden und junge Dozenten nahmen an meinen Übungen teil, doch wohl mehr aus Interesse für die reizvollen Alpenfotos als aus Begeisterung für den Inhalt meiner Lehrveranstaltung. Eine, die stets dabei war, war Judy Ann McKenzie. Stets machte sie sich nützlich, hängte Landkarten auf, kümmerte sich um den Diaprojektor oder vervielfältigte Skripte, wenn es nötig war. Judy McKenzie studierte Isotopenchemie. Eines Tages besuchte sie mich.

«Wovon handelt Ihre Doktorarbeit?», fragte ich sie.

«Ich schreibe über Geo-Secs.»

«Geo-Sex?»

«Nicht S-e-x, sondern S-e-c-s. Es ist ein bedeutendes Forschungsprojekt, das die Chemie des Meerwassers entlang gewisser Sektionen untersucht.»

«Und was tun Sie dabei?»

«Ich arbeite an einer Extraktionslinie für Stickstoff, die in ein Massenspektrometer eingespeist wird.»

Ich konnte nicht verstehen, wie sich jemand für die Isotopen-Zusammensetzung von in Meerwasser aufgelösten Gasen interessieren konnte, aber ganz genau wußte auch Judy McKenzie es nicht. Eigentlich war sie zu mir gekommen, um mich zu fragen, ob ich etwas «Handfesteres» für sie hätte – etwas, bei dem sie sehen konnte, was sie tat. Ja – ich hatte etwas. Eine Gruppe unserer Leute aus Zürich beschäftigte sich mit den neuzeitlichen Sedimenten im Persischen Golf, und unser Team benötigte einen Isotopen-Chemiker. Schließlich kam Judy McKenzie zu uns nach Zürich und promovierte über unsere Arbeiten im Bereich des Persischen Golfes.

Damals hatte ich keine Ahnung, daß zehn Jahre später «Geo-Secs»-Forscher uns erstmals klarmachen sollten, wie ein Meteoriteneinschlag für Jahrtausende ganze Tierarten ausrotten konnte.

Es gibt gewisse Entsprechungen zwischen Kriegen – jenen Katastrophen, die wir selbst heraufbeschwören – und Naturkatastrophen: Sie töten. Die

Menschheitsgeschichte kennt jedoch zahlreiche Beispiele dafür, daß sich die Bevölkerung von Kriegen verwüsteter Länder rasch wieder erholt hat. Analog ist auch die rapide Erholung von Arten nach Naturkatastrophen typisch. Nach einer Schätzung von David Raup würden selbst dann, wenn durch eine Katastrophe sämtliche Organismen auf einem Viertel der Erdoberfläche umkämen, nur ganze 2 % der lebenden Arten wirklich aussterben. Der Grund dafür ist: Die meisten Arten von Lebewesen sind über die ganze Welt verbreitet. So kann die Vernichtung allen Lebens in einer bestimmten Region zwar die dort heimischen Lebensformen umbringen, jedoch nicht die gesamte Art ausrotten. Ist die Katastrophe erst einmal vorüber, bevölkern neue Zuwanderer das verwüstete Gebiet und beginnen sich dort neu zu vermehren.

Eine sehr große Katastrophe kann nicht nur töten, sondern auch unvorhersehbare Folgen haben. Vielleicht würden viele einen Atomkrieg überleben, möglicherweise nicht nur ein paar Maoris oder patagonische Indianer, die in ihren abgelegenen Winkeln die Katastrophe überdauern würden. Doch sie und ihre Nachkommen wären nicht mehr imstande, eine Welt neu zu bevölkern, die infolge der Umweltzerstörung für den Menschen nicht mehr bewohnbar wäre. In einer von wissenschaftlichen Gemeinschaften erarbeiteten Studie trug ein Gremium von Wissenschaftlern das Denkmodell eines «atomaren Winters» vor. Mit aller Nüchternheit folgerten sie, daß im Gefolge eines Atomkrieges die Art *Homo Sapiens* ganz und gar zum Aussterben verurteilt sei. Könnte es sein, daß der Einschlag am Ende der Kreidezeit eine ebenso starke Umweltzerstörung hervorrief, so daß die überlebenden Arten der dunklen Monate noch Zehntausende von Jahren nach dem Holocaust allmählich ausstarben?

Zum Glück für uns gibt es auch Studenten wie Peter Kropnick, einen Komilitonen von Judy McKenzie, der bei «Geo-Secs» blieb. Er und andere führten für ihre Doktorarbeiten wertvolle Forschungen durch. Angaben aus der «Geo-Secs»-Forschung sowie weitere Daten, die Judy McKenzie bei der Isotopenanalyse von Binnensee-Sedimenten erhob, machten schließlich klar, was sich vielleicht vor 65 Millionen Jahren abgespielt und die Ozeane damals für das Plankton unbewohnbar gemacht hatte.

Wir neigen dazu, uns die Ozeane als homogene Wassermasse mit einer bestimmten chemischen Zusammensetzung, einem durchschnittlichen Salzgehalt und einer mittleren Jahrestemperatur vorzustellen. Doch gibt es regionale Unterschiede, und diese sind es, durch die der Ozean lebt.

Der Ozean ist nicht statisch. Winde und Gezeiten erzeugen Oberflächenströmungen, deren Kenntnis für die Seeleute des Altertums sehr wichtig war. Aber auch die Gewässer des mittleren Tiefenbereichs und des Meeresbodens sind nicht ohne Dynamik.

Deutsche U-Boot-Kommandanten wußten das sehr genau. Während des Zweiten Weltkrieges machten sie sich diese Strömungen zunutze, um unentdeckt zu bleiben. Wenn sie die Straße von Gibraltar durchfuhren, wo

die britische Marine auf Lauschposten lag, stellten sie ihre Motoren ab. Um ins Mittelmeer einzulaufen, hielten sich die U-Boote in geringer Tiefe und ließen sich von der Oberflächenströmung treiben, die dem Mittelmeer Atlantikwasser zuführt. Um das Mittelmeer zu verlassen, tauchten sie tiefer und ließen sich von der Bodenströmung treiben.

Das Mittelmeerwasser kehrt als Bodenströmung in den Atlantik zurück, denn es ist dichter als das Wasser, das vom Ozean her eindringt. Dichter ist es, weil das Mittelmeerwasser durch die Verdunstung einen größeren Salzgehalt hat und weil es von den kalten Winden abgekühlt wurde, die vom europäischen Kontinent herüberwehen. Auch tief im Atlantik, im Pazifik sowie im Indischen Ozean hat man Bodenströmungen entdeckt, die sich mit den Bodenströmungen des Mittelmeeres vergleichen lassen. Woher stammen diese salzigeren, kälteren und dichteren Wasserströme?

Zwei wichtige Herkunftsgebiete ozeanischer Bodenströmungen sind das Weddellmeer in der Antarktis und der vor Norwegen gelegene Teil des nordatlantischen Ozeans. Dort, wo das Meerwasser zu Eis gefriert, haben die kalten Polargewässer einen höheren Salzgehalt als der übrige Ozean. Die Zunahme der Wasserdichte erzeugt genügend hydrodynamischen Druck, um die Zirkulation der ozeanischen Bodenströmungen in Gang zu bringen. Man hat die Polarmeere als die Lungen des Ozeans bezeichnet, denn besonders durch sie werden die Ozeane mit Sauerstoff aufgefüllt. Die Grundströmungszirkulation läßt sich daher mit dem Blutkreislauf vergleichen, denn durch diese Strömungen wird allen Teilen des Ozeans Sauerstoff zugeführt, den die Meeresorganismen durch ihren Stoffwechsel verbrauchen, so lange sie leben, aber auch durch ihre Verwesung, wenn sie tot sind.

Letztlich ist die Atmosphäre die Quelle des Sauerstoffs; aber auch das Wasser an der Meeresoberfläche enthält gewöhnlich viel davon. Besonders reich ist das Wasser natürlich in den Polarregionen, denn in kälterem Wasser kann sich mehr Gas auflösen. Sobald dieses sauerstoffreiche Wasser in die Tiefsee hinabsinkt, reichert es auch die Gewässer am Meeresboden mit Sauerstoff an. Ozeanische Tone sind an vielen Stellen so stark oxydiert, daß sie in strahlenden Farben leuchten, denn relativ stark oxydiertes (rostiges) Eisen ist leuchtend rot.

Zwischen der Oberfläche und der Tiefsee, in mittleren Tiefenregionen, stagniert das Wasser vielerorts und enthält nicht so viel Sauerstoff. Die Sedimente dieser Meeresbereiche sind daher durch winzige Partikel organischen Materials, die in dieser Zone nicht ganz so stark oxydiert sind, grau oder schwarz gefärbt. Zahlen, die dieses Muster der Sauerstoffverteilung illustrieren, wurden in mühsamer Kleinarbeit von Kropnick und seinen Kollegen im Rahmen des Geo-Secs-Projektes ausgearbeitet, die dabei von Wallace Brooker aus Lamont und Harmon Craig vom Scripps-Institut angeleitet wurden.

Kohlendioxyd ist ein wesentlicher Bestandteil der Lebensvorgänge, denn es ist der Grundnährstoff aller Organismen. Pflanzen bilden ihr Zellgewebe durch Photosynthese aus Kohlendioxyd und aus dem Zucker des

Wassers. Wir ernähren uns direkt oder indirekt von pflanzlichem Gewebe oder Pflanzensamen, die von pflanzenfressenden Tieren in Fleisch umgesetzt werden, das wir dann essen. Wenn wir sterben, hinterlassen unsere verwesenden Leichname ihrerseits Kohlendioxyd und Wasser. Beides findet dann seinen Weg zurück in den Ozean und in die Atmosphäre.

So wichtig Kohlendioxyd ist, so unbedeutend ist – rein mengenmäßig – sein prozentualer Anteil an der Atmosphäre. Im Vergleich zu den 20 % Sauerstoff macht es nur 0,03 % der Luft aus. Obwohl es viel leichter löslich ist als andere atmosphärische Gase, beträgt doch der Anteil des im Meerwasser aufgelösten Kohlendioxyds an der Meeresoberfläche weniger als 1 Gramm pro Liter. Die Anteile des Kohlendioxyds in der Atmosphäre und im Ozean stehen zueinander in Beziehung: Je größer der Kohlendioxydgehalt der Luft, desto mehr Gas ist im Wasser aufgelöst und umgekehrt. Auch die unterschiedlich starke Vermehrung des Phytoplanktons der Ozeane beeinflusst die Auflösung des Gases im Wasser. Beispielsweise hat ein fruchtbarer Ozean mit häufigen Planktonblüten einen hohen Verbrauch an Kohlendioxyd. Ein steriler Ozean dagegen, in dem kein Plankton gedeiht, ist reich an Kohlendioxyd.

Der Verbrauch von Kohlendioxyd ist ein Phänomen der Gewässer nahe der Meeresoberfläche, denn Phytoplankton gedeiht nur in so geringen Tiefen, daß noch genügend Licht für die Photosynthese zur Verfügung steht. In der Regel beträgt die Tiefe nicht mehr als 50 Meter. In größeren Wassertiefen dagegen findet fast kein Kohlendioxydverbrauch statt. Dort reichert sich das Wasser mit diesem Gas an. Ursache ist die Verwesung der toten Organismen, die auf den Meeresboden sinken, und bei deren Zerfall Kohlendioxyd frei wird, das sich im kalten Wasser des Meeresbodenbereichs rasch auflöst.

Der Austausch von Kohlendioxyd zwischen dem Ozean und der Atmosphäre ist – wie der Sauerstoffaustausch – Ergebnis des «Stoffwechsels» in der Natur. Besonders in küstennahen Gebieten gelangt das Tiefseewasser an die Meeresoberfläche. Dabei entweicht das aufgelöste Kohlendioxyd aus dem Wasser und reichert die Atmosphäre an. Umgekehrt aber löst sich das in der Atmosphäre vorhandene Gas in den obersten Wasserschichten des Meeres und wird durch das Phytoplankton in eine organische Substanz verwandelt. Mit den toten Organismen sinkt es wieder zum Meeresboden hinab und reichert durch die Verwesung das Wasser erneut an. Dieser zyklische Vorgang vollzieht sich unaufhörlich. Walter Broecker, der den radioaktiven Kohlenstoff 14 als Indikator verwendete, stellte fest, daß jährlich etwa eine halbe Trillion Tonnen atmosphärisches Kohlendioxyd im Oberflächenwasser der Ozeane aufgelöst, vom Phytoplankton aufgenommen und nach dem Tode der Mikroorganismen in der Tiefe wieder freigesetzt und erneut im Wasser aufgelöst wird. Von den Ozean-Bodenströmungen wird es verteilt und steigt schließlich nach etwas mehr als 2000 Jahren wieder an die Oberfläche.

Dieser zweitausendjährige Kreislauf ist eine dynamische Konstante. In der dünnen Meeresoberschicht, in die das Licht eindringt und in der das

Plankton gedeiht, ist das Meerwasser stets arm an Kohlendioxyd. Die Hauptmasse des Ozeanwassers dagegen, die durch die Zirkulation der Meeresströmungen homogenisiert wird, bleibt verhältnismäßig reich an Kohlendioxyd. Dieses Verteilungsmuster des im Ozean aufgelösten Kohlendioxyds wurde von Geo-Secs-Experten sogar in Karten und Diagrammen festgehalten.

Im Wasser gelöstes Kohlendioxyd aber ist Kohlensäure – eine zwar schwache Säure, aber eine Säure immerhin. Dies ist einer der Gründe dafür, daß Mineralwasser und Brauselimonade so schädlich für unsere Zähne sind. Das in solchen Getränken aufgelöste Kohlendioxyd, das in Form der aus der Brause aufsteigenden Blasen entweicht, zerfrißt den Zahnschmelz. In den Ozeanen greift kohlendioxydreiches Wasser das Gehäuse toter Muscheln an, die gewöhnlich aus Kalziumkarbonat bestehen. Daß es auf dem Meeresboden überhaupt noch kalziumhaltige Schlämme gibt, verdanken wir der Tatsache, daß sich mehr Skelette von Nannoplankton und *Foraminiferen* oberhalb der Kalzitkompensationstiefe (CCD) anhäufen, als die schwache Kohlensäure im Wasser der Meeresbodenregion auflösen kann. Nur wo die Auflösungsrate höher ist als die der Akkumulation, besteht das Bodensediment aus einem Ton wie dem kreidezeitlich-tertiären «Grenzton».

Bei Gubbio sind spätkreidezeitliche und frühtertiäre Sedimente aus Kreide oder Kalkgestein vorhanden – es handelt sich um die angehäuften winzigen Skelette von *Foraminiferen* und Nannoplankton, die vor und nach der großen endkreidezeitlichen Katastrophe lebten. Dazwischen, unmittelbar über dem Grenz-«Ereignis», das durch die Iridiumanomalie gekennzeichnet ist, befindet sich eine dünne Tonschicht. An einigen Stellen besteht dieses Grenzsediment zwar ebenfalls aus Kalkgestein, hat jedoch höhere Tonanteile als die Ablagerungen unmittelbar darunter und darüber. Als Thomas Worsley diesen Verbrauch des Kalziumkarbonats in den Grenzsedimenten feststellte, die er 1970 untersuchte, äußerte er die Ansicht, das Ozeanwasser sei am Ende der Kreidezeit ungewöhnlich korrosiv gewesen, weil es außergerwöhnlich viel aufgelöstes Kohlendioxyd enthalten habe. Meerwasser mit solcher Chemie habe alle Planktonskelette aufgelöst und lediglich die unlöslichen Reste als «Grenzton» übriggelassen.

Andererseits aber könnte dieser «Grenzton» auch das Ergebnis eines zu geringen «Nachschubs» an Skeletten gewesen sein, ja, wir können sogar noch einen Schritt weitergehen: Die Zufuhr toten Planktons fehlte, weil es zu wenige Plankton-Organismen gab. Nicht nur ein Ozean voll von korrosivem Wasser würde einen kalziumfreien Ton ablagern, sondern auch ein völlig steriles Meer ohne Lebewesen. Wie können wir dieses Problem lösen?

Das Geo-Secs-Projekt und unsere eigenen Untersuchungen von Binnensee-Sedimenten führten uns zu der Vermutung: Vielleicht sind es die Kohlenstoffisotope, die uns Hinweise auf die urzeitliche Plankton-Produktivität geben.

Bei einer Massenspektrometeranalyse des Kalziumkarbonats wird eine Gesteinsprobe aufgelöst und das aus ihr gewonnene gasförmige Kohlendioxyd

dem Gerät eingespeist. Als Harold Urey an seinem «Paläothermometer» arbeitete, maß er das Verhältnis der Sauerstoffisotope seiner Proben. Gleichzeitig gewann er aber auch Angaben über das anteilige Verhältnis ihrer Kohlenstoffisotope. Er konnte mit diesen Resultaten nichts anfangen. Er war sich ganz sicher, daß die Zusammensetzung der Kohlenstoffisotope zumindest nicht sehr stark von der Temperatur des ökologischen Milieus beeinflusst sein konnte, in dem ein Organismus sein Kalkskelett absondert. Außerdem fand er ganz unterschiedliche Kohlenstoffisotopenwerte, doch gelang es ihm nicht, zwischen ihnen und anderen variablen Größen Beziehungen herzustellen – sei es im Zusammenhang mit fossilen oder heute noch lebenden Organismen.

Tatsächlich hatte man bereits seit Jahrzehnten Kohlenstoffisotopendaten für ozeanische Sedimente gesammelt, doch hatte man sie nicht alle veröffentlicht, zumal die Naturwissenschaftler nicht immer verstehen konnten, wie die Ergebnisse zu deuten seien. Das Problem wurde 1973 in Kiel auf einem Forum einer internationalen Konferenz über ozeanisches Plankton diskutiert. Niemandem fiel damals etwas besonders Kluges dazu ein. Die Sauerstoffisotopenanalyse konnte nützliche Aufschlüsse über urzeitliche Ozeantemperaturen liefern, doch die Kohlenstoffisotopenanalyse erbrachte lediglich Daten, die sinnlos erschienen.

In der Masse der Daten, die das Geo-Secs-Projekt erbrachte, zeichnete sich allerdings schließlich ein Muster ab. Überall, wo die Ozeanographen forschten, fanden sie schließlich eine ähnliche Variation der Kohlenstoffisotopenzusammensetzung: Wasser der Meeresoberfläche hat einen höheren Anteil von Kohlenstoff 13 im Vergleich zu Kohlenstoff 12 als das Wasser der mittleren Meeresschichten oder das Wasser am Meeresboden.

Sobald dieser Trend erst einmal klar war, gaben auch die Isotopendaten der Sedimente einen Sinn. Kalkige Schlämme bestehen aus fossilen Skeletten, die Organismen aufbauen, indem sie dem Meerwasser Kalzium und aufgelöstes Kohlendioxyd entnehmen. Daher enthalten die Kalziumkarbonskelette sowohl Kohlenstoff-13- als auch Kohlenstoff-12-Atome aus dem Kohlendioxyd. Das relative Vorkommen beider Isotope hängt chemisch vom ursprünglichen Vorkommen im «Rohmaterial», den kalkhaltigen Skeletten, ab. Je mehr Kohlenstoff 13 im Wasser enthalten ist, desto mehr Kohlenstoff 13 nehmen die Organismen auf. Die Kohlenstoffisotopenzusammensetzung in den Skeletten der betreffenden Organismen spiegelt somit einfach den Kohlendioxydgehalt des Wassers, in dem die betreffenden Lebewesen heimisch sind. Dasselbe gilt auch für Fossilien und die aus ihnen entstandenen kalkhaltigen Sedimente, nicht aber für die Zellgewebe lebender Organismen. Diese entnehmen dem Wasser, das sie umgibt, einen wesentlich geringeren Anteil an Kohlenstoff 13, ganz unabhängig davon, wie die Isotopenzusammensetzung des Wassers beschaffen ist, in dem sie leben. Weil die weichen Zellgewebe der Organismen im Gegensatz zu ihren Schalen bevorzugt Kohlenstoff 12 aufnehmen, können sie die Isotopenzusammensetzung des Wassers beeinflussen, in dem sie leben.

Lebendes Phyto- und Zooplankton gibt es nur in den Bereichen nahe der Meeresoberfläche. Weil die Zellgewebe dieser Organismen Kohlenstoff 12 dem Kohlenstoff 13 vorziehen, ist das Oberflächenwasser des Meeres überall dort, wo diese Planktonarten «blühen», reich an Kohlenstoff-13-Atomen, die «ungenutzt» geblieben sind. Auch Meeresbodenbewohner mögen Kohlenstoff 13 nicht, doch sind sie nicht zahlreich genug, um sehr viel Wirkung zu haben, so daß der Anteil des Meeresgrundwassers an Kohlenstoff 13 sich von dem des durchschnittlichen Ozeanwassers nicht allzu sehr unterscheidet.

Wenn aber sowohl der Verbrauch von Kohlendioxyd als auch die relative Anreicherung mit Kohlenstoff-13-Atomen in den Oberflächengewässern der Ozeane von den dort lebenden Plankton-Organismen herrühren – was geschähe dann, wenn es in den Ozeanen kein Plankton mehr gäbe? Ich richtete diese Frage an Wally Broecker, als dieser 1981 an unser Institut kam, um einen Vortrag über die Kohlenstoffisotope in den Ozeanen zu halten.

Ich kannte Broecker schon seit einiger Zeit. Er ist ein angesehener Fachmann für Meeres-Geochemie – das Spezialgebiet meiner jungen Kollegin Judy McKenzie. Als diese sich darum bewarb, in die Geologische Gesellschaft Amerikas aufgenommen zu werden, benannte ich Broecker als einen der Befürworter, die sie benötigte. Die Mitgliedschaft in einem Fachverband ist wie die Zugehörigkeit in einer Gewerkschaft. Alle angesehenen nordamerikanischen Geologen gehören der Geologischen Gesellschaft Amerikas an – so hatte ich wenigstens gedacht. Durch einen Brief von der Verwaltung der Geologischen Gesellschaft wurde ich eines Besseren belehrt. Broecker, so informierte man mich, könne Judy McKenzies Bewerbung um die Mitgliedschaft gar nicht befürworten, weil er selbst der Gesellschaft nicht mehr angehöre. Der vielbeschäftigte Gelehrte hatte ganz einfach vergessen, seinen Jahresbeitrag zu entrichten!

Am meisten wurde Broecker durch seine Arbeiten über den Kohlendioxydkreislauf in den Ozeanen bekannt. Er sprudelte förmlich vor Ideen, wie die Gasbläschen aus einer Mineralwasserflasche. Nach mehreren Jahren der Verwaltungsarbeit in Lamont hatte man ihm einen Bildungsurlaub in Heidelberg gewährt. Ein Schweizer Freund hatte davon gehört und mich gefragt, ob wir ihn für ein paar Vorträge bei uns in Zürich gewinnen können. Ich war davon sehr angetan, ihn als Besucher bei uns zu haben, wenn er auch kein Mitglied unseres Fachverbandes mehr war.

Eine der aufregendsten Entdeckungen in den frühen achtziger Jahren machten Chemiker, die die chemische Zusammensetzung der Luft analysierten, die seit Jahrtausenden in Blasen in uraltem Eis eingeschlossen war. Sie fanden eine wesentlich niedrigere Kohlendioxydkonzentration in dieser «fossilen» Luft, die während der Eiszeit eingeschlossen worden war. Broecker hatte auch gleich eine Erklärung dafür, warum die Atmosphäre der Eiszeit dermaßen kohlendioxydarm war.

Während der Eiszeit, als mehr an Nährstoffen reiches Tiefenwasser an die Oberfläche gelangte, waren die Ozean-Oberflächengewässer «ertragrei-

cher» als heute. Damals muß das Plankton ungeheuer fortpflanzungsfreudig gewesen sein. Je mehr Plankton aber vorhanden ist, desto höher ist der Kohlendioxidverbrauch und desto mehr wird dieses Gas der Atmosphäre entzogen. Ozeanische Sedimente enthalten tatsächlich Anhaltspunkte dafür, daß die Fortpflanzung des Planktons seinerzeit erheblich größer war als heute. Broecker schlug uns eine Methode vor, dies auf zweifache Art zu überprüfen, und zwar unter Verwendung von Kohlenstoffisotopen.

Durch die Geo-Secs-Daten wußten wir, daß die Gewässer der Meeresoberfläche vergleichsweise arm an Kohlenstoff 12 sind, weil das Phytoplankton dieses Isotop mit Vorliebe verstoffwechselt. Wenn also das eiszeitliche Plankton besonders zahlreich war, mußte das Wasser an der Meeresoberfläche besonders arm an Kohlenstoff 12, aber reicher an Kohlenstoff 13 sein als heute. Und die eiszeitlichen Werte sollten sich auch im damaligen fossilen Plankton spiegeln, denn fossile Skelette geben genauestens Aufschluß über die Kohlenstoffisotopenmischung des Wassers, in dem sie sich bildeten. Darüber hinaus waren die Meeresbodenbewohner nie zahlreich genug, um das Isotopenverhältnis in den Wassern der Tiefe zu verändern, in der sie lebten. Deshalb müssen die Unterschiede zwischen dem Anteil an Kohlenstoff 13 in ihren Fossilien und denen der Meeresoberflächenbewohner damals größer gewesen sein als heute. Von den bis dahin veröffentlichten, wenigen Kohlenstoffisotopendaten ausgehend, konnte Broecker für die Eiszeit einen größeren Unterschied zwischen dem Kohlenstoff-13-Gehalt der *Foraminiferen* im Wasser der Meeresoberfläche und am Meeresboden konstatieren, als er heute besteht – ein deutliches Indiz für die Produktivität des Planktons in dieser kalten Epoche.

Seine Erklärung ließ mir keine Ruhe. Wenn eine ungewöhnlich hohe Plankton-Fortpflanzungsrate zu einer besonders ausgeprägten Differenz zwischen dem Kohlenstoff-13-Gehalt der Planktonskelette an der Meeresoberfläche und am Meeresboden führte – was wäre dann, wenn das Gegenteil geschehen wäre, wenn es überhaupt keine Plankton-Fortpflanzung gegeben hätte?

«O, Sie fragen mich nach dem <Strangelove-Effekt>», antwortete Broecker gutgelaunt, als ich ihm nach seinem Vortrag diese Frage stellte. «Ein Ozean ohne Plankton hätte keine Isotopenabstufung. Es gäbe von oben bis unten genau die gleiche Isotopenzusammensetzung. Der Ozean wäre ein <Ozean à la Dr. Strangelove>».

Ich hatte den betreffenden Film nie gesehen, wußte aber: Es ging darum, daß ein gewisser Dr. Strangelove die Absicht hatte, durch einen nuklearen Weltbrand bis auf eine kleine Elite alles Leben auszulöschen. Diese sollte den Planeten dann neu bevölkern. Halb im Scherz hatte Broecker einen sehr anschaulichen Ausdruck geprägt. Ich ließ mir die Chance nicht entgehen, seine Formulierung in meiner nächsten Veröffentlichung zu verwenden.

Natürlich war das, was Broecker sagte, die reine Theorie. Wir können nicht einfach sämtliche Lebewesen in den Ozeanen ausrotten, um zu beweisen, daß dann die Kohlenstoffisotopenzusammensetzung des Wassers vom Mee-

resspiegel bis hinab zum Meeresgrund die gleiche wäre. Doch Binnenseen sind kleiner als der Ozean, und hier hat die Natur mancherlei Experimente durchgeführt, was die Produktivität des Planktons angeht. Es war Judy McKenzie, die im Zuge ihrer Forschungen über den Ursprung der Seekreide in den Schweizer Seen ungewollt Beweise für den «Strangelove-Effekt» entdeckte.

Der Greifensee in der Nordostschweiz ist ein sogenannter eutrophischer See: Landwirtschaft und Industrie haben im Lauf des letzten Jahrhunderts durch übermäßige Phosphat- und Nitratzufuhr den normalen Zufluß an Nährstoffen in solchem Ausmaß verstärkt, daß die organische Produktivität dieses Sees einen ungeheuer hohen Grad erreicht hat; der Höhepunkt des Algenwachstums liegt im Juli und August. Da die Algen keine Kohlenstoff-13-Atome «mögen», führt dies im Sommer zu einer maximalen Abstufung nach unten, denn dann hat das Wasser an der Oberfläche 4,5 Promille mehr Kohlenstoff-13-Atome als das Wasser in der Tiefe des Sees. Wenn jedoch der Herbst beginnt, läßt die biologische Aktivität der Algen nach. Die Proben von der Wasseroberfläche, die Judy McKenzie Ende September entnahm, weisen nur noch 3 Promille mehr Kohlenstoff-13-Atome auf als die dem Seebodenwasser entnommenen. Mit Beginn des Winters gehen die Algen dann zum Winterschlaf über, und ihr Wachstum hört auf. Mitte Dezember haben Proben des gesamten Seewassers von der Oberfläche bis zum Seegrund die gleiche Isotopenzusammensetzung. Kommt der Frühling und mit ihm Anfang Mai die erste Algenblüte, gibt es wieder eine leichte Abstufung, die sich im Sommer verstärkt. Dieser Zyklus des Kohlenstoffs 13 wiederholt sich im Greifensee Jahr für Jahr.

Judy McKenzies Analysen der Kohlenstoffisotopenanteile in den Wasserproben aus dem Greifensee zeigen ein bestimmtes Schema jahreszeitbedingter Veränderungen. Ozeane aber haben ein sehr viel größeres Reservoir aufgelöster Kohlenstoffverbindungen als Seen. Deshalb haben auch kurzfristige Fruchtbarkeitszyklen von Jahreszeit zu Jahreszeit nur wenig Einfluß auf ihre Isotopenabstufungen im Wechsel der Jahreszeiten. Doch langfristige, ausgedehnte Zu- oder Abnahmen der organischen Produktivität können sich auch hier auswirken.

Die Vorstellung eines «Strangelove-Ozeans» ohne Produktivität läßt sich mit dem winterlichen Greifensee vergleichen, dessen Algen im Winterschlaf liegen. Wenn infolge der Inaktivität des Planktons keine Kohlenstofffraktionierung mehr stattfindet, wäre die Meereschemie durch aufsteigendes Wasser vom Meeresgrund und absinkendes Wasser von der Meeresoberfläche allmählich ausgeglichen. In zweitausend Jahren wären dann die Kohlenstoff-13-Werte in allen Wasserschichten völlig gleich – so wie im winterlichen Greifensee.

Gab es denn aber einen solchen «Strangelove-Ozean» nach der kreidezeitlichen Katastrophe?

Nachdem ich mir viele Jahre über Kohlenstoffisotopenanalysen fossiler Skelette den Kopf zerbrochen hatte, bin ich zu dem Schluß gelangt, daß man

diese Frage bejahen muß. Ich erinnerte mich an einen von Nick Shackleton 1978 gehaltenen Vortrag über Kohlenstoffisotopendaten, die er über die *Foraminiferen* der frühesten känozoischen Sedimente gesammelt hatte. Im Gegensatz zu seinen Erwartungen waren die Planktonskelette dieser Proben nicht so reich an Kohlenstoff-13-Atomen wie in normalen Ozeanen. Shackleton war verblüfft. Er bot vier oder fünf Erklärungen an, doch ganz glücklich war er über keine von ihnen.

Auch ich hatte seinerzeit keine Ahnung, was seine Kohlenstoffisotopendaten bedeuten konnten. Doch nachdem Broecker mich aufgeklärt und Judy McKenzie mir von ihrer Arbeit im Greifensee berichtet hatte, wurde mir klar, was Shackletons Daten aussagten. Nach dem Ende der Kreidezeit gab es keine Anreicherung von Kohlenstoff 13 in den fossilen Skeletten der Planktonorganismen, die nahe der Meeresoberfläche gelebt hatten, weil zu wenig Phytoplankton vorhanden war, um die Isotopenfraktionierung vorzunehmen. Es gab also damals den «Strangelove-Ozean»!

Wie es oft geht, hatten wir schon jahrelang die richtigen Daten vor Augen gehabt, die auf eine Kohlenstoffisotopenanomalie am Ende der Kreidezeit hindeuteten. Tom Anderson und sein Doktorand J. C. Brennecke hatten nämlich schon im Jahre 1977 entdeckt, daß die frühesten tertiären Sedimente im Vergleich zu denen der jüngsten Kreidezeit stets sehr arm an Kohlenstoff-13-Atomen waren.

Die starke Abnahme des Kohlenstoffs 13 im Grenzbereich ist eine Anomalie, die etwa dem Zehnfachen der sogenannten «Hintergrundschwankung» entspricht. Keine Veränderungen der Kohlenstoffisotopenzusammensetzung ozeanischer Sedimente gingen so rasch vor sich wie die, die sich während der paar Jahrtausende an der Grenze zwischen Kreide und Tertiär vollzogen. Die Kohlenstoffisotopenanomalie war nur eine kurzfristige Störung, denn nach ein paar Jahrtausenden kehrte die Isotopenzusammensetzung wieder zu den Werten der späten Kreidezeit zurück und blieb dabei.

Was aber bedeutete diese Störung?

Wie Shackleton waren auch Anderson und Brennecke durch ihre eigenen Funde verblüfft und erkannten die Bedeutung ihrer Entdeckung selbst nicht. Erst eine gründliche Analyse der Proben aus unserem Kern 20, der fünf Jahre später im Kapbecken an Bord gehievt wurde, lieferte uns den letzten Stein, der es möglich machte, das Puzzle zu verstehen.

Anderson und Brennecke hatten ihre Analysen an Proben durchgeführt, die meist Planktonskelette, zusätzlich aber auch Skelette einiger Meeresbodenbewohner enthielten. Sie hatten eine Abnahme von Kohlenstoff 13 festgestellt, doch weil sie Bewohner der Meeresoberfläche nicht von Meeresbodenbewohnern unterschieden, hatten sie keine Ahnung, ob eine Abstufung existierte. Isotopenmessungen unserer aus dem Südatlantik stammenden Meeresbodenproben bestätigten ihre Entdeckung: Der Kohlenstoff-13-Gehalt des «Grenztons» ist geringer als der der Sedimente unterhalb der Grenze. Doch wir wollten genauer wissen, was dem Lebensraum Ozean zugestoßen war. Deshalb untersuchten wir das Material, das von Meeres-

oberflächenbewohnern stammte, genauer: Das Resultat war die gleiche Anomalie wie bei den Proben insgesamt. Alles deutete darauf hin, daß an der Meeresoberfläche eine Veränderung des Isotopenverhältnisses stattgefunden hatte. Damit noch immer nicht zufrieden, isolierte Ramil Wright aus unseren Proben die seltenen Exemplare benthischer *Foraminiferen*, so daß wir auch an ihnen Messungen des Isotopenverhältnisses vornehmen konnten. Diese benthischen Skelette wiesen an oder beiderseits der Grenze zwischen Kreide und Tertiär keine Anomalie auf und bestätigten uns somit, daß der abnorme Abfall des Kohlenstoffs 13 nur in den Gewässern der Meeresoberfläche stattgefunden hatte, wo das Plankton seinen Lebensraum hatte oder – genauer gesagt – nicht mehr hatte.

In jüngeren Sedimenten zeigte sich: Die von den wenigen verbleibenden Planktonorganismen bevölkerten Oberflächengewässer begannen erneut, das von ihnen bevorzugte Kohlenstoff-12-Isotop zu verbrauchen, und in dem Maße, wie sich der übriggebliebene Kohlenstoff 13 wieder anhäufte, wurde erneut eine Abstufung von oben nach unten hin hergestellt.

Die Kohlenstoffisotopenwerte erwiesen sich mithin als ausgezeichnete Indikator für die Produktivität der Organismen im Ozean, und wie die Iridiumanomalie fand sich auch die Kohlenstoffisotopenanomalie überall in den Sedimenten des Grenzbereichs. Mithin gab es nach der endkreidezeitlichen Katastrophe eine weltweite biologische Krise, durch die der Ozean nahezu steril wurde. Der normale Prozeß der Kohlenstoffisotopenfraktionierung kam zum Stillstand. Für die nächsten beiden Jahrtausende waren die Gewässer der verschiedenen Tiefenschichten völlig gleichförmig hinsichtlich der Isotopenzusammensetzung des in ihnen enthaltenen Kohlenstoffs.

Ein genauer Blick auf unsere Daten zeigte, daß die Skelette der planktonischen Organismen sogar einen noch niedrigeren Kohlenstoff-13-Gehalt hatten als die ihrer benthischen Zeitgenossen. Wir schrieben dies der Tatsache zu, daß es nach der Katastrophe der Endkreidezeit regelrechte «Strangelove-Kontinente» gab.

Auch Pflanzen an Land entnehmen für ihr Zellgewebe der Atmosphäre lieber Kohlenstoff-12- als Kohlenstoff-13-Atome. Wenn sie absterben und verfaulen, oxydiert ihre organische Substanz. Das dabei entstehende Kohlendioxyd wird freigesetzt, im Grundwasser aufgelöst und schließlich durch die Flüsse in den Ozean gespült. «Strangelove-Kontinente» voller faulender Pflanzenreste würden dem Ozean außerordentlich viel organischen Kohlenstoff sowie außergewöhnlich hohe Mengen aufgelösten Kohlendioxyds zuführen. Land und Meer würden noch mehr an Kohlenstoff 13 verarmen, als es allein durch das Absterben des Planktons geschehen wäre.

Allerdings war der älteste tertiäre Ozean nach der endkreidezeitlichen Katastrophe kein absoluter «Strangelove-Ozean». Die Planktonvermehrung hörte nicht gänzlich auf, so daß sich unter den Grenzsedimenten immerhin noch kalkhaltige Schlämme befanden, wenn auch die tonige Beschaffenheit überwog. Die Befunde zeugten zwar von einer Störung, aber doch nicht von einem absoluten Stillstand des Lebens im Ozean. Anscheinend waren genü-

gend Skelette von *Foraminiferen* und Nannoplankton produziert worden, so daß sich in manchen Teilen des Ozeans weißliche Schlämme abgelagerten.

Nach Jahren des Forschens stellten wir endlich in den verschiedenen Arten von Grenzsedimenten ein ungewöhnliches Verteilungsmuster fest. So wurde in mittleren Tiefen von 2000–3000 Metern ein kohlenstoffhaltiger Schlamm abgelagert, der mehr oder weniger Ton enthielt. Ton ohne jede Kohlenstoffverbindung lagerte sich unterhalb der Kalzitkompensationstiefe (CCD) auf den Ebenen des Tiefseebodens ab. Doch die Ablagerung in Küstengewässern erwies sich als Ausnahme. An den Rändern der Kontinente ist die Planktonproduktion in der Regel sehr groß, und wo das Wasser nicht korrosiv ist, bestehen die Sedimente in aller Regel auch aus Schlämmen, die Kalziumkarbonat enthalten. Überraschenderweise handelt es sich bei den frühesten tertiären Sedimenten auf Kontinentalsockeln keineswegs um Schlämme. Es sind Tone – der «Grenzton» bei Gubbio und der «Fischton» in Stevn's Klint. Daß es in diesen Tönen keine Planktonskelette gibt, läßt sich nur damit erklären, daß damals das Meerwasser in den Küstenregionen sehr korrosiv gewesen sein muß. Vielleicht erzeugte die Oxydation ungewöhnlicher Mengen organischer Überreste, die von den damaligen «Strangelove-Kontinenten» ins Meer gespült wurden, ein Übermaß an Kohlensäure, die die Küstengewässer korrosiv werden ließ.

Durch die Oxydation ungewöhnlicher Mengen organischen Kohlenstoffs zu Kohlendioxyd wird auch Sauerstoff in außergewöhnlich großen Mengen verbraucht. Mehr noch: Die Photosynthese ist die einzige Quelle des Sauerstoffs in der Atmosphäre. Wenn aber sowohl in als am Meer lebende Organismen, die durch die Photosynthese leben, dezimiert worden sind, kann man sich vorstellen, daß die Atmosphäre viel weniger Sauerstoff enthalten hatte. Bei der geringen Sauerstoffzufuhr und dem ungewöhnlich hohen Sauerstoffverbrauch dürften die Küstengewässer außerordentlich sauerstoffarm gewesen sein. Gibt es Beweise dafür in unserem Sedimentenbefund?

Allerdings – es gibt sie!

1982 besichtigte ich die berühmte Fundstätte Stevn's Klint in Dänemark. Der «Grenzton» ließ sich hier leicht lokalisieren. Die Kreide, die der «Kreidezeit» ihren Namen gab, ist weiß. Von gleicher Farbe ist auch der tertiäre Kalkstein. Doch der «Grenzton» ist schwarz. Außerdem läßt er eine papierdünne Feinschichtung erkennen. Beides – die Farbe und die Feinschichtung – sind ausgezeichnete Indikatoren dafür, daß dem Wasser am Meeresboden der Sauerstoff fehlte, als sich der «Grenzton» abgelagerte. Die zarte Feinschichtung blieb erhalten, weil nur wenige oder gar keine Tiere lebten, die eine Störung hervorrufen konnten. Es gab keine Tiere am Meeresboden, weil es im Wasser für sie keinen Sauerstoff zum Atmen gab, und es gab keinen Sauerstoff, weil er durch die Fäulnis all des organischen Materials aufgebraucht war, das von den toten Kontinenten ins Meer gespült worden

war. Die nicht oxydierten Überbleibsel und der nichtoxydierte Kohlenruß, der von Waldbränden stammte, färbten das Sediment schwarz.

Die Zuführung eines Übermaßes an Kohlenstoff von den verwüsteten Kontinenten konnte nicht sehr lange gedauert haben. Im Laufe einiger Jahrtausende waren die Überreste des abgestorbenen Materials entweder vom Wasser abgetragen oder unter neuen Sedimenten verschüttet worden. Die sich erholende Vegetation bedeckte das Land mit neuen Wäldern, so daß der Kohlenstoff im Boden blieb und die Erosion auf ein Mindestmaß zurückging. Der Befund aus den Untersuchungen der Übergangszone bestätigt, daß die Sauerstoffverarmung der Küstengewässer nicht länger als ein paar tausend Jahre dauerte. Beispielsweise beschrieb Walter Alvarez zwei Färbungen im Grenzton von Gubbio. Der untere halbe Zentimeter ist grau, der obere rot. Weil die Ablagerung des «Grenztons» insgesamt etwa 5000 Jahre gedauert haben muß, kann die Bildung der grauen Sedimente, die in einer Phase der Sauerstoffarmut stattfand, nicht mehr als insgesamt 2500 Jahre umfaßt haben. Danach hatte das Wasser wieder genügend Sauerstoff, um dem Ton die Farbe rostigen Eisens zu geben.

Was das Wasser am Meeresboden angeht, so gibt es Beweise dafür, daß dies seinerzeit weit weniger sauerstoffarm war als in den Küstengebieten. Der «Grenzton» im Kapbecken hat eine dunklere Schattierung als die unterhalb oder oberhalb liegenden Sedimente, doch immerhin hat auch er noch eine rötliche Färbung, was darauf hindeutet, daß zumindest etwas Sauerstoff vorhanden gewesen sein muß. Auf den ebenen Partien des Meeresbodens entdeckt man im Grenzbereich überhaupt keine Farbänderung, doch an vielen Stellen des Stillen Ozeans, sogar im roten «Grenzton» des Zentralpazifik, fand man zwei Mineralien, deren Bildung für sauerstoffarmes Milieu typisch ist: Pyrit und Glaukonit. Eben dort wurden auch ungewöhnliche Konzentrationen von Arsen und Antimon entdeckt. Diese Metalle aber können nur aus sauerstoffarmem Meeresbodenwasser ausgefällt werden. So unbedeutend diese Auswirkungen auch sein mögen – sie zeigen doch, daß die chemische Veränderung des Meerwassers nach der Katastrophe bis hinab zum Meeresboden reichte.

Gäbe es derartige Beweise chemischer Veränderung in einem Binnensee, könnte man sie für Zeugnisse eines schlechten Jahres im Leben der dort heimischen Organismen halten. Doch in dem riesigen Ozean, der bei einer mittleren Tiefe von 4 Kilometern drei Viertel des Erdballs bedeckt, muß man einen solchen Befund anders deuten. Die Tiefe und Weite des Ozeans fördern die Tendenz, derartige Störungen der Chemie in größere, Jahrtausende umfassende Zyklen einzubinden. Wären ein paar Monate absoluter Finsternis das Schlimmste gewesen, das sich vor 65 Millionen Jahren ereignete, hätten wir davon entweder gar nichts erfahren – oder wir hätten Beweise für eine rasche Wiederherstellung der normalen Lebensbedingungen gesehen. Sobald die Sonne wieder aus den alles verdunkelnden Staubwolken aufgetaucht wäre, hätte das verbleibende Plankton begonnen, sich in der üblichen

Weise zu vermehren. Nannoplankton-Organismen können sich wenigstens einmal pro Tag teilen. Die Blüte des Planktons im Frühjahr und Sommer führt zu einer Produktion von 10 Millionen Individuen pro Liter Wasser, das sind mehr als 300 Milliarden Organismen, die jeden Quadratmeter der Meeresoberfläche bevölkern und durch die Photosynthese leben. Das Gesamtareal solcher blühender Plankton-«Teppiche» aus Abermilliarden von Kleinstlebewesen kann viele Tausende von Quadratkilometern umfassen.

Die Entdeckung des «Strangelove-Ozeans» im sedimentären Befund lehrt, daß für eine viel längere Periode, als sie allein durch die Dunkelheit erklärbar wäre, die Sterblichkeit hoch, die Vermehrungsrate dagegen niedrig war, ferner, daß die Wiederherstellung normaler Verhältnisse langsamer vor sich ging und die Aussterberate größer war, als daß sie allein durch ein Massensterben zu erklären wäre. Tatsächlich hätten sich die Ozeane rasch wieder erholt und das Überleben der Arten gewährleistet, selbst wenn diese nur noch durch einige wenige überlebende Individuen vertreten gewesen wären.

Die wichtigste Begrenzung für das Blühen des Planktons besteht in der Größe des Nahrungsangebotes. Doch die Nahrung, die das Plankton braucht, wäre während der unproduktiven Monate der Dunkelheit konserviert worden, ja ein Übermaß an «Düngemitteln» – Phosphaten und Nitraten – hätte ein Jahrtausend lang die Oberflächengewässer des Ozeans mit der Flut des organischen Materials der entwaldeten Kontinente angereichert. Das Nahrungsangebot für das Plankton hätte sich also vergrößert. Gab es daher sogar «Planktonblüten»?

Zwar zeigten Sedimentproben aus dem Grenzbereich, daß immerhin einige wenige Planktonarten die Katastrophe überlebt hatten, doch gab es tatsächlich auch zwei Gattungen, die da blühten: die *Thoracosphaera* und die *Braarudosphaera*. Untersuchungen an lebenden Planktonarten, die von diesen Gattungen abstammen, zeigen, daß diese auch bei ungewöhnlichen Temperaturen, bei außergewöhnlichem Salzgehalt und ungewohnter Meereschemie gedeihen. Daß gerade diese Arten überlebten, während andere allmählich zugrundegingen, zeugt also von einer sehr starken Umweltbelastung. Die Massensterblichkeit des Planktons hat vielleicht zu einem «Strangelove-Ozean» geführt, doch daß so viele Arten sich nicht erholten, läßt die Folgerung zu, daß der «Strangelove-Ozean» zu Beginn des Tertiärs noch immer verseucht und somit die Fortpflanzung der meisten Planktonarten nicht möglich war.

Zufälligerweise gingen damals die Lebewesen an der gleichen Art von Umweltverschmutzung zugrunde, die heute unsere Wälder sterben läßt. Allerdings hatte sie damals andere Ursachen.

Saurer Regen und Stickoxyde

In China gibt es ein altes Sprichwort: «Unfälle stoßen immer den Nachbarn zu, Katastrophen aber ereignen sich im eigenen Garten.» Mein Sohn Peter sollte die Wahrheit dieser alten chinesischen Spruchweisheit am eigenen Leibe zu spüren bekommen, als er zwölf Jahre alt war.

Peter war ein leidenschaftlicher Angler, und er hatte auch schon einige Erfahrung gesammelt, als er von der Schule befreit war, weil ich meine Familie auf eine ausgedehnte Vortragsweise nach China mitgenommen hatte. Im Herbst – wir waren wieder in die Schweiz zurückgekehrt – fing Peter zwei prächtige Barsche: Es war ein Fang, für den er einen Preis verdient hätte. Wie allen Anglern ging es ihm vor allem um die Trophäen. Großfischer hängen ihre Beute an die Wand ihres Wohnzimmers, damit man sie dort sieht und darüber spricht. Peter hatte eine bessere Idee: Er wollte seine Prunkstücke lebend aufbewahren. Also mußten wir unseren kleinen Seerosenteich in unserem Garten in einen Fischteich umwandeln.

Doch bald kam der Winter. Peter bekam das Aquarium zugesprochen, in dem sein älterer Bruder Martin Wasserpflanzen gezüchtet hatte. So hatten die beiden Barsche, von denen der eine sanft und gelehrig, der andere aber unzugänglich und aggressiv war (und denen wir, zu Ehren zweier Schulkameraden Peters, die Kosenamen Ralph und Nicki gegeben hatten), ein komfortables Winterquartier.

Ein Problem war die Ernährung der beiden Tiere. Ralph und Nicki entwickelten einen ungeheuren Appetit. Jeder von ihnen konnte pro Tag sechs bis acht Würmer verschlingen. Peter mußte mit Eispickeln den gefrorenen Boden aufhacken, um genügend Würmer für seine Lieblinge zu finden.

Als der Frühling kam, brachten wir die beiden Barsche wieder in ihr Sommerquartier, und um ihnen den Schock eines plötzlichen Temperaturwechsels zu ersparen, gossen wir, als der Umzug stattfand, warmes Wasser in den Seerosenteich. Peter hinterließ sogar letzte Instruktionen, bevor er zu Bett ging: Sein Vater sollte um Mitternacht noch einmal einen Eimer warmes Wasser in den Seerosenteich schütten, damit Ralph und Nicki nicht erfroren.

Der kleine Teich wurde regelmäßig gesäubert und geschrubbt. Wie Forellen brauchen auch Barsche zu ihrer gesunden Entwicklung sauberes und sauerstoffreiches Wasser. Nicht besonders glücklich über den chlorhaltigen Stoff aus unserer Wasserleitung, entwarf Peter ein ausgeklügeltes Sammelssystem: Regenwasser aus der Dachtraufe wurde in einem Kunststoffbehälter gesammelt, und von diesem mit Hilfe eines Gartenschlauches in den Seerosenteich geleitet.

In diesem Frühjahr regnete es viel. Fast zwei Wochen hintereinander hatten wir nichts als Regen. Peter verkündete voller Stolz, daß seine Erfindung erfolgreich arbeite. Statt des Leitungswassers führe sein Fischteich jetzt nur noch Regenwasser. Ich wurde aufgefordert, mir die Sache anzusehen, und zeigte mich entsprechend beeindruckt. Ralph und Nicki wirkten ganz munter und zogen ihre Bahnen durch das kristallklare Wasser.

Doch leider dauerte das Glück nicht lange. Als unser Wasseraustausch beendet war, kam Peter aus der Schule nach Hause und fand Ralph und Nicki tot im Teich. Was konnte nur geschehen sein? Hatten Nachbarn Katzen oder böse Gassenbuben seine Lieblinge getötet? Nein – das konnte nicht sein. Wir hatten im Garten weder Katzen noch Kinder gesehen.

«Es war Euer verdammtes verseuchtes Wasser», argwöhnte der junge Jonas, ein Nachbar und Peters Angelgenosse, der uns zu dem Seerosenteich gefolgt war.

«Aber es war nicht verschmutzt! Es gibt nichts Reineres als Regenwasser! Und es ist so klar, daß man den Boden des Beckens sieht!»

Tatsächlich – das Wasser war klar. Es war geradezu eine Lust zu sehen, wie klar es war. Doch die Fische waren tot.

Peter versuchte alles, um die Ursache des Desasters zu finden. Sogar eine Wasserprobe wurde dem Fischteich entnommen und Peters Schwester Elisabeth übergeben, die an der Universität Biologie studierte. Sie konnte zwar keine chemische Analyse vornehmen, schlug aber in ihren Lehrbüchern nach und fand: In Wasser mit dem pH-Wert 5 oder darunter haben Barsche nicht die geringste Überlebenschance. Die Abkürzung pH (für *potentia hydrogenii*) verwendet man, um die Wasserstoffionenkonzentration oder – mit anderen Worten – den Säuregehalt einer Lösung auszudrücken. Eine neutrale Lösung hat den pH-Wert 7, eine Lösung mit dem pH-Wert 6 besitzt eine zehnmal so hohe Konzentration von Wasserstoffionen und ist infolgedessen sauer. Eine Flüssigkeit mit dem pH-Wert 5 ist bereits um den Faktor hundert säurehaltiger als eine neutrale Lösung.

War es möglich, daß wir sauren Regen hatten?

«O ja», antwortete meine Frau Christine auf diese Frage. «Erst im vergangenen Monat hat der Stadtrat dieses Problem diskutiert. Die Heizungsanlage der Technischen Hochschule an unserer Straße verbrennt schwefelhaltiges Öl. Da ihre Schornsteine recht niedrig sind, hat sich in unserer Nachbarschaft viel Umweltgift verbreitet. Besonders in kalten Wintern ist es schlimm, wenn sämtliche Ölfen auf volle Leistung gefahren werden.»

Jetzt begann ich mich für das Problem zu interessieren und blätterte *Nature* nach Aufsätzen über sauren Regen durch. Die Regierungen skandinavischer Länder, so erfuhr ich da, hatten sich darüber beklagt, daß Umweltgifte aus den Industriegebieten der britischen Inseln sauren Regen erzeugten. Der pH-Wert des Wassers nordskandinavischer Seen liegt teilweise sogar unter 5. Das Wasser dieser Seen hat also einen so hohen Säuregehalt, daß hier kein Fisch überlebt hat. Dasselbe Problem besteht bei den Seen der Adiron-

dacks im Staate New York. Die hohen Schornsteine der Fabriken im Mittelwesten pusten ihre Umweltgifte bis in den Nordosten der USA, ja bis nach Kanada. Mehr als hundert Seen der Adirondacks haben heute infolge des Säuregehaltes im Wasser keinen Fischbestand mehr. Viele Flüsse in Neuschottland sind dermaßen sauer geworden, daß dort kein Lachs mehr laichen kann.

Ich rief meinen Freund Werner Stumm an, der die Eidgenössische Anstalt für Gewässerschutz leitet. Er mußte wissen, ob wir sauren Regen in unserem Garten hatten.

«Aber ja», erwiderte Stumm. «Sie sind an der richtigen Adresse. Gerade letztes Jahr habe ich einen Aufsatz über sauren Regen veröffentlicht. Ich sende Ihnen ein Exemplar davon.»

Ich ging zunächst einmal gar nicht darauf ein und kam direkt zur Sache. Konnte er mir nicht einfach mitteilen, wie hoch der pH-Wert des Regenwassers in Zürich war?

Stumm erklärte, sauren Regen hätten wir in der gesamten Schweiz, nicht nur in Zürich, sondern auch im Tessin, in Genf und in Sankt Gallen. Der pH-Wert typisch schweizerischen Regenwassers läge bei 4,3. Die Säurebestandteile wären zu 50 % Schwefel, zu 30 % Salz und zu 20 % Salpetersäure. Zum Glück neutralisierten die zahlreichen Kalksteinformationen in der Schweiz den zu starken Säuregehalt rasch, doch nach neuesten Zahlen hätten die Seen in den Granitgebieten des Kantons Tessin wegen des sauren Regens einen pH-Wert von nur mehr 4,5.

Das war alles, was Peter wissen wollte. Seine kunstreiche Vorrichtung hatte die Übersäuerung des Wassers gefördert. Er hatte in ein paar Tagen geschafft, was in zwei Jahrzehnten in den Tessiner Seen geschehen war. Wie unsere Barsche Ralph und Nicki kam auch unser Leitungswasser aus dem Zürichsee. Der pH-Wert dieses Sees liegt bei etwa 8 – ein gutes Stück unter dem des Regens also. Peter hatte seine beiden Lieblingstiere selbst umgebracht, indem er seinen Fischteich zu einer Zisterne sauren Regenwassers machte.

Nicht nur Fische, sondern alle Lebewesen im Wasser werden von hohem Säuregehalt geschädigt. Weichtiere überleben einen Säuregehalt von weniger als pH 6 nur selten. Zahllose Insektenarten und sogar das Zooplankton gehen in Gewässern mit einem pH-Wert von weniger als 5 zugrunde. Sinkt der pH-Wert gar unter 4, wird das Wasser sogar nahezu steril. Saurer Regen spielt auch eine Rolle im Zusammenhang mit dem tragischen Waldsterben in Mitteleuropa. Wenn er durch das Geäst der Fichten oder Tannen tropft, nimmt der Regen organische und mineralische Säuren auf und trifft infolgedessen mit noch mehr Säure angereichert auf dem Boden auf, in dem die Bäume wurzeln. Ein dermaßen hoher Säuregehalt löst Kalium, Kalzium und andere Mineralsalze auf und beraubt so die Bäume ihrer wichtigsten Nahrung. Bäume, so hatte ich gelesen, können auf diese Weise erkranken und schließlich eingehen.

Meine Tochter Elisabeth war allerdings nicht der Ansicht, daß das Sterben der Bäume viel mit dem sauren Regen zu tun hatte. Sie schrieb gerade eine Arbeit über dieses Problem und hatte viel darüber gelesen. Nach ihrer Auffassung (und der Ansicht der Experten) ist der wahre Übeltäter NO_x .

In der Hauptsache besteht die Erdatmosphäre aus Stickstoff (*Nitrogenium*, abgekürzt: N) und Sauerstoff (*Oxygenium*, abgekürzt: O). Bei normalen Temperaturen reagieren diese beiden Gase nicht miteinander. Mit anderen Worten: Sie gehen miteinander keine chemischen Verbindungen ein. Bei sehr hohen Temperaturen jedoch verbindet sich Stickstoff (N) mit einer beliebigen Anzahl (x) von Sauerstoffatomen (O), und so entsteht eine Reihe sogenannter Stickoxyde, die wir als NO_x bezeichnen – Stickstoff-Sauerstoff-Kombinationen wie NO_1 , NO_2 und dergleichen mehr. Die Temperatur in der Atmosphäre ist selten so hoch, um NO_x entstehen zu lassen; Blitze gehören zu den seltenen Fällen, wo natürliches NO_x entsteht. Doch es blitzt relativ selten, und deshalb ist die natürliche Stickoxyd-Produktion unbedeutend. Verbrennungsvorgänge in Industrieanlagen und in Kraftfahrzeugmotoren dagegen erzeugen entsprechende Dauerhitze, bei der NO_x entsteht. Elisabeth sagte mir, daß 1980 etwas über 30 Millionen Tonnen NO_x produziert worden seien, von denen nahezu die Hälfte aus Automotoren stammte.

Aus NO_x -Verbindungen (Stickoxyden) entsteht schließlich durch weitere Oxydation Salpetersäure, die ein wesentlicher Bestandteil des sauren Regens ist. Doch allein Stickoxyd-Verbindungen sind schon sehr schädlich. Beispielsweise war NO_x jenes wirksame Entlaubungsmittel, das die Amerikaner ausgiebig im Vietnamkrieg verwendeten. Das NO_x aus den Abgasen unserer Autos zerstört ferner unsere Wälder. Mithin gilt: Saurer Regen tötet, und Stickoxyde (NO_x) verpesten die Luft. Allerdings sind sie Nebenerzeugnisse der industriellen Revolution, einer Schöpfung des menschlichen Geistes. Könnte es denn aber auch sauren Regen und NO_x -Verbindungen vor 65 Millionen Jahren gegeben haben, als Dinosaurier die am höchsten entwickelte Tiergattung waren? Die Antwort bekam ich auf der Snowbird-Konferenz des Jahres 1981 – ein paar Monate, nachdem wir Peters Fische begraben hatten. Selbstverständlich ging mir der Gedanke an die Luftverschmutzung im Kopf herum und ließ mich nicht mehr los.

Als Physiker begriff Luis Alvarez rasch die physikalischen Folgen des Einschlages eines Meteoriten mit einem Gewicht von einigen Billionen Tonnen. Daß bei der Katastrophe Staub aufgewirbelt und bis in die Stratosphäre geschleudert wurde, ist ebenso einleuchtend wie die daraus resultierende Finsternis. So schlüssig sich Alvarez' Modell der «Finsternis am helllichten Tage» auf den ersten Blick auch ausgenommen hatte, wonach das große Artensterben der Finsternis zuzuschreiben war – genauerer Prüfung hielt es doch nicht stand. Denn das Problem der Langzeitwirkungen läßt sich nicht aus der Welt schaffen: Wenn nach der Katastrophe Zehntausende von Jahren vergingen, bevor die letzten todgeweihten Arten ausgestorben waren, konnte das Massenaussterben nicht von einer vorübergehenden Finsternis oder an-

deren kurzfristigen Auswirkungen herrühren. Vielmehr mußte das Artensterben auf eine langfristige Folge des Meteoriteneinschlages zurückgehen. Im Gegensatz zu Alvarez hatte ich mich mit Geochemie befaßt. Daher war es für mich leichter, an eine chemische Auswirkung der Kometenkollision zu denken. Ich hatte auf der vorangegangenen Konferenz in Ottawa den Gedanken an eine Vergiftung durch Zyanide (hochgiftige Blausäureverbindungen) als Ursache des weltweiten Artensterbens erwogen. Ganz abgesehen von der Möglichkeit einer Blausäurevergiftung sind auch gewisse Schwermetalle, die im kreidezeitlich/tertiären «Grenzton» nachgewiesen wurden, außerordentlich giftig. Osmium und Ruthenium beispielsweise haben bereits in Konzentrationen von nur wenigen Anteilen pro Milliarde eine schädliche Wirkung, und auch Arsen, Selenium, Antimon und andere Elemente, die sich im «Grenzton» fanden, sind hochgradig toxisch. Weil die Konzentration dieser Metalle im «Grenzton» so hoch ist und man ausschließen kann, daß sie irdischen Ursprungs sind, äußerte Paul Feldmann vom Herberg-Institut in Kanada die Ansicht, wir könnten zu einer Art von Konsens darüber gelangen, «daß es Beweise für ein kometenartiges Objekt gibt, das flüchtige Giftstoffe in die Umwelt der Erde gebracht habe».

Doch die ersten Erklärungsversuche von Wissenschaftlern gehen oft in die Irre. Das Problem bei dem «Vergiftungsmodell» bestand darin, daß die außerirdische Zufuhr der genannten Gifte zu gering war, um eine weltweite Vergiftung hervorzurufen. Berechnungen zeigten vielmehr, daß die Konzentration von Zyaniden, Kohlenmonoxyd und giftigen Schwermetallen, die ein Meteorit dieser Größe in das Meer eingebracht hätte, weltweit einer tödlichen Dosierung nicht einmal nahekam. Ich hatte in einer Studie, die ich im Frühjahr zuvor veröffentlicht hatte, diese Klippe umschifft, indem ich die Ansicht vertrat, daß sich das toxische Material überwiegend in den oberen Meeresregionen konzentriert habe. Bei einer solchen auf bestimmte Meeresbereiche beschränkten Giftkonzentration wäre die Giftanhäufung gerade hoch genug gewesen, um eine selektive Artenausrottung unter dem Plankton der Meeres-Oberflächenströmungen hervorzurufen. Diese Theorie schien mir auch ganz bequem zu erklären, warum benthische Organismen der Katastrophe entkamen. Von den extraterrestrischen Giften wäre nicht viel bis in die Wasser tief unten am Meeresgrunde hinabgedrungen.

Bis zu der Snowbird-Konferenz war ich davon überzeugt, mit der Version der Zyanidvergiftung vielleicht die richtige Antwort gefunden zu haben. Doch noch am Vormittag meiner Ankunft begegnete ich Tom Ahrens von der Technischen Hochschule Kaliforniens. Er beglückwünschte mich zu meiner glänzenden Idee, machte mir jedoch klar, daß sie nicht funktionierte. «Der gewaltige Einschlagsdruck und die hohen Temperaturen nach dem Einschlag hätten sämtliche Zyanide zerstört, die vielleicht freigesetzt wurden», versicherte er mir.

Er hatte recht. Die Einschlagtemperatur muß mehrere tausend Grad betragen haben. Sie muß hoch genug gewesen sein, um Zyanidverbindungen

oder andere giftige Gase zu entionisieren, als der gifthaltige Komet sich in eine Feuersäule verwandelte, die über der Einschlagstelle kilometerhoch in den Himmel stieg und sich in der Stratosphäre als Pilzwolke ausbreitete. Doch genau dieses Denkmodell eröffnet auch die Möglichkeit, an das Entstehen anderen toxischen Materials zu denken.

John Lewis von der Universität von Arizona hielt in Snowbird einen aufsehenerregenden Vortrag über «Chemische Folgen größerer Einschlagereignisse für die Erde». Er bestätigte, was mir schon Ahrens gesagt hatte: Die Temperatur des Feuerballs, der bei einem größeren Einschlag entsteht, ist so hoch, daß giftige Moleküle, die der Kometenkopf enthält, keine Überlebenschance haben. Als zweiten Punkt hob er die Folgen einer schockartigen Erhitzung der Erdatmosphäre hervor. Aus Forschungen im Zusammenhang mit Blitzschlägen, Nuklearwaffen-Tests und dem Tunguska-Ereignis ergibt sich mit Gewißheit, daß eine bedeutende Menge von NO, insbesondere des die Bäume entlaubenden Stickoxyds, dabei entstehen würde.

Lewis und seine Mitarbeiter hatten auf der Grundlage verschiedener Annahmen Berechnungen angestellt. Folgt man der Annahme, daß ein steinerner Meteorit mit dem Gewicht von einigen Billionen Tonnen mit einer Geschwindigkeit von 14 Kilometern pro Sekunde eingeschlagen ist, so hätten sich dabei eine Milliarde Tonnen von Stickoxyd-Molekülen gebildet. Dies wäre aber eine noch eher bescheidene Schätzung. Ein Komet wäre wahrscheinlich viel schneller auf die Erde zugerast. Bei einer Einschlaggeschwindigkeit von 40 Kilometern pro Sekunde wäre die Stickoxyd-Bildung schon hundertmal höher gewesen, nämlich mehr als 100 Milliarden Tonnen Stickoxyd. Diese Verbindung oxydiert durch das Ozon in der Stratosphäre und den Sauerstoff in der Atmosphäre weiter. So entstehen rasch neue chemische Verbindungen wie NO₂, N₂O₄ und andere Varianten von NO_x. In weniger als einer Stunde, so erklärte Lewis, wäre die Atmosphäre durch eine katastrophal hohe Menge von NO_x verschmutzt gewesen.

Lewis belegte mit Zahlen, daß das durch den Einschlag erzeugte NO_x in wenigen Wochen auf der geographischen Breite der Einschlagstelle verbreitet gewesen wäre, daß es aber ein paar Jahre gedauert hätte, bis das Gift sich rings um den gesamten Erdball verbreitet hätte. Inzwischen wäre das in der Luft enthaltene NO_x durch die atmosphärische Feuchtigkeit als Salpetersäure oder salpetrige Säure ausgespült worden und als saurer Regen zur Erde gefallen. Infolgedessen nahm Lewis an, daß die NO_x-Verschmutzung vielleicht nicht global, sondern auf die mittleren Breiten des Erdballs beschränkt war. Diese Luftverschmutzung könnte einen Ost-West-Streifen der Erdatmosphäre von mindestens 2000 Kilometern Breite und 35000 Kilometern Länge versucht haben. Dies wären 14 % des gesamten Erdballs.

Das Muster der Zerstörung der endkreidezeitlichen Flora paßt zu der Annahme, daß es ein Komet war, der in einer mittleren bis hohen nördlichen Breite einschlug. Eine solche Hypothese würde die damalige Entwaldung Nordamerikas erklären, von der die Pollenanalyse zeugt, desgleichen die

nahezu völlige Verwüstung der Flora in der *Aquilapolleniten*-«Provinz», die sich von Sibirien bis nach Alaska hin erstreckt.

Wenn sich auch die unmittelbare Schädigung der Pflanzenwelt vielleicht auf einen solchen Ost-West-Gürtel beschränkte, so könnten doch einige Dauerauswirkungen auf die Tierwelt weltumspannend gewesen sein. Eine außerordentlich schwerwiegende Frage wäre die des Verschwindens des Ozons aus der Stratosphäre, weil durch die chemische Reaktion mit den Stickoxyden (NO_x) dieses aufgebraucht worden wäre. Brian Toon und seine Mitarbeiter hatten die chemischen Auswirkungen des Tunguska-Ereignisses untersucht. Ihren Berechnungen zufolge muß es in der nördlichen Hemisphäre durch die Produktion von 30 Millionen Tonnen NO_x einen Ozonabbau von 35–45 % gegeben haben. Sie überprüften dann ihre Berechnungen anhand der tatsächlichen Werte, die das astrophysikalische Observatorium der *Smithsonian Institution* auf dem Mount Wilson in den Jahren unmittelbar nach der Explosion an der Tunguska gesammelt hatte. Tatsächlich war während der ersten vier Jahre nach dem Meteoriteneinschlag das Ozon um 30 % verringert worden. Allerdings reguliert sich eine solche Schädigung schließlich von selbst. Denn wenn sich das Ozon in der Stratosphäre verringert, dringen mehr ultraviolette Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre. Gerade diese verstärkte UV-Strahlung fördert ihrerseits die Produktion von Ozon (O_3) aus Sauerstoff (O_2). Je größer allerdings der Schaden ist, desto länger dauert es, ihn zu beheben. Toon berechnete nur die minimale Auswirkung eines Meteoriteneinschlags von einer Billion Tonnen Gewicht und kam auf einen extremen Ozonrückgang von 90 % im ersten Jahr und noch immer mehr als 50 % in den folgenden Jahren. Weitergehende Schätzungen von O'Keefe und Ahrens gingen von einer vollständigen Zerstörung der Ozonschicht für mindestens ein Jahrzehnt aus.

Die Ozonschicht der Erde schützt die Organismen vor den tödlichen Auswirkungen der unter der wissenschaftlichen Bezeichnung UVB bekannten, sehr intensiven Ultraviolettstrahlung der Sonne. Biologen der Nationalen Akademie der Wissenschaften der USA, die die Auswirkungen eines Atomkrieges untersuchten, kamen 1975 zu dem beunruhigenden Ergebnis, daß die Zerstörung dieser Ozonschicht durch Kernwaffen-Explosionen möglicherweise gefährlichere Folgen hätte als die unmittelbare Strahleneinwirkung durch den radioaktiven Fallout selbst. Gegenwärtig nähert sich die Einwirkung der UVB-Strahlen der Grenze dessen, was Lebewesen vertragen können. Die Strahlung erzeugt bei uns Menschen Sonnenbrand und bei längerer Einwirkung Hautkrebs. Ist man jedoch der UVB-Strahlung völlig schutzlos ausgeliefert, so begünstigt dies die Entwicklung der verschiedensten Krebsarten, verändert die Keimzellen und wirkt tödlich. Abnorme Keimzellen können zu Unfruchtbarkeit, zu Fehlgeburten, Totgeburten, Mißgeburten und erheblichen Veränderungen der Chromosomen führen.

Eine der sensationellsten Entdeckungen im Zusammenhang mit einem Forschungsprojekt über den «nuklearen Winter» kündigte die Nationale

Akademie der Wissenschaften im September 1985 an. Zwei Ärzte der Brown-Universität hatten herausgefunden, daß es nach einer Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht durch Reaktion mit Stickoxyden zur Schädigung oder gar Zerstörung der von der Thymusdrüse gebildeten Zellen (T-Zellen) im tierischen Organismus kommen würde. Die Ultraviolettstrahlung kann so – ebenso wie das HTL-3-Virus der erworbenen Immunschwäche AIDS – zu einer Schädigung des Immunsystems führen, wodurch die Widerstandskraft der Organismen gegen eine Unmenge anderer Krankheiten herabgesetzt wäre.

Es ist durchaus möglich, daß viele der endkreidezeitlichen Tierarten ausstarben, weil sie ungeschützt der lebensvernichtenden Wirkung des nicht mehr durch Ozon gefilterten Sonnenlichtes ausgesetzt waren, und daß nur Arten überleben konnten, denen die ungewöhnliche Härte der UVB-Strahlung nichts ausmachte, weil sie beispielsweise in hinreichender Wassertiefe lebten, sich eingruben oder nur nachts aktiv waren. Ein paar Einzelexemplare der überlebenden Arten erfuhren vielleicht nützliche Mutationen, wodurch sich die Entwicklung neuer Arten sicher beschleunigt hat. Doch das kann natürlich noch nicht alles gewesen sein.

Die Finsternis, die Luftverschmutzung und der Ozonabbau taten ihr Werk rasch und schmutzig. Der Staub muß sich aber relativ schnell abgesetzt haben, denn die luftverschmutzenden Stoffe verschwanden innerhalb eines Jahres, und die Ozonschicht war sehr wahrscheinlich innerhalb eines Jahrzehnts wiederhergestellt. Die Überlebenden hätten sich dann rasch wieder erholt. Doch dies war keineswegs der Fall. Statt dessen gingen viele Arten in ihrem Bestand weiterhin zurück, bis sie vollständig ausgestorben waren. Der Grund dafür ist wahrscheinlich in der Tatsache zu sehen, daß inzwischen das Wasser verseucht war. Aus der Luft war nämlich durch den Regen etwa eine Billion Tonnen Salpetersäure ausgespült worden, und die befand sich nun im Boden und im Meer.

Zuerst hatte ich gedacht, saurer Regen würde mehr den Pflanzen und Tieren an Land als in den Ozeanen schaden, weil sich derartige Umweltgifte vor allem in Teichen und Gewässern ohne Abfluß konzentrieren. Man kann sich unschwer vorstellen, daß ein kleiner See dermaßen übersäuert ist, daß alle Tiere in ihm ebenso umkommen wie Peters Fische in unserem kleinen Gartenteich. Der Ozean jedoch ist unermesslich groß, und eine Billion Tonnen Salpetersäure kann seine Chemie noch nicht wesentlich verändern. Selbst wenn sich die gesamte Säure in den obersten 75 Metern des Meerwassers gesammelt hätte, wie Lewis, der Stickoxydexperte, vermutete, hätte sich der pH-Wert des Wassers doch nur um eine halbe Einheit geändert, was, mit anderen Worten, einen nur dreimal höheren Säuregehalt bedeutet hätte. Diese Veränderung erschien mir nicht tiefgreifend genug, um viele Organismen auszurotten. Doch der paläontologische Befund zeigt, daß Süßwassertiere und Pflanzen an Land wenig evolutionäre Änderungen erfuhren, während ausgerechnet das Meeresplankton in den frühesten Jahren des Tertiärs fast ganz und gar ausgestorben ist. Wenn saurer Regen daran schuld war –

warum trugen dann diese Tier-und-Pflanzen-Lebensgemeinschaften im Meer den stärksten Schaden davon?

Eine Antwort hierauf lautet: Ein kleines System ist zwar leichter zu verseuchen als ein so großes wie der Ozean, dafür erholt es sich aber auch rascher. Nachdem Ralph und Nicki in unserem Seerosenteich umgekommen waren, wurde das saure Regenwasser einfach abgelassen und durch Leitungswasser ersetzt, um neue Fische einsetzen zu können. Entsprechendes kann ich mir auch für Ökosysteme an Land vorstellen. Vielleicht verloren einige Wälder ganz und gar ihre Belaubung. Auch manche Seen und Flüsse mögen in so hohem Maße verseucht gewesen sein, daß es zum Massensterben kam. Doch der Regen, ob sauer oder nicht, reinigt die Luft, und weitere Niederschläge spülen das verseuchte Wasser in den Ozean. Vielleicht waren das Land, die Binnenseen und die Flüsse anfangs stärker verseucht, doch sie wären schließlich wieder zu intakten Lebensräumen für Zuwanderer geworden.

Eine zweite Antwort kommt der Sache schon näher. Die Evolution bietet die Garantie dafür, daß kein Organismus sich zu seinem Schaden entwickelt, denn diejenigen Individuen, bei denen eine Entwicklung zum Negativen hin auftritt, haben entweder nur wenig Nachkommen oder leben nicht lange genug, um überhaupt Nachkommen zu haben. Doch niemand hat verfügt, daß eine Eigenschaft, die sich unter normalen Lebensumständen als nützlich erweist, dies auch bleiben muß, wenn sich die Umwelt verändert hat. Der nordamerikanische Elch beispielsweise benötigt eine gewisse Mindestzahl kalter Tage, um fortpflanzungsfähig zu werden. Dies ist ein hervorragendes Beispiel der Anpassung an ein bestimmtes Klima. Dort, wo der Elch heimisch ist, würde eine zu früh trächtige Elchkuh ihre Jungen werfen, wenn das Wetter noch viel zu kalt und viel zu wenig Futter vorhanden wäre, um die Jungtiere zu ernähren. In England dagegen, wo der Landadel schon seit Jahrhunderten versucht, in den Parks seiner Schlösser und Villen Elche zu halten, vermehren sich diese Tiere überhaupt nicht. Es gibt hier einfach nicht genug Frosttage im Jahr, um sie fortpflanzungsfähig zu machen. Wenn sich das Klima aber ganz allmählich änderte, könnte es immerhin in jeder Elch-Generation ein paar Individuen geben, deren biologische Uhr ein wenig anders geht als die ihrer Artgenossen und die schon mit ein paar wenigen Frosttagen auskämen, um sich paaren zu können. Allmählich würde sich so die Tierpopulation auf einen neuen Zeitplan einpegeln – mit anderen Worten: Sie hätte sich dem veränderten Klima angepaßt. Doch wenn die Elche in ihrer nordamerikanischen Heimat einem ebenso raschen Klimawechsel ausgesetzt wären wie bei ihrer Verpflanzung nach England, würden sie sicherlich aussterben.

Plankton ist ganz hervorragend an die spezifischen Verhältnisse, an Temperatur und Chemie des Ozeans angepaßt. Jeder Wissenschaftler jedoch, der den Versuch unternimmt, Plankton zu züchten, kann bezeugen, wie störanfällig die Fortpflanzungsfähigkeit dieser Lebewesen ist. Einer meiner früheren Mitstudenten begann eine Dissertation über Umweltfaktoren, die

das Züchten von Plankton im Labor erschweren. Er gab nach einem Jahr auf, denn es gelang ihm überhaupt nicht, diese Organismen zur Fortpflanzung zu bewegen. Zwar glückte es ihm, lebende Exemplare zu fangen, die in seinem Laboratorium sogar weiterlebten, doch ihre Fortpflanzung unter Laborbedingungen war um keinen Preis zu erreichen. Dies war vor mehr als dreißig Jahren. Inzwischen ist es Experten gelungen, einige Arten von Meeresplankton im Laboratorium zu züchten, doch selbst bei diesen muß im künstlichen Meerwasser des Labors stets genau die richtige Temperatur und Chemie wie unter natürlichen Lebensbedingungen gegeben sein. Plankton zu züchten, ist noch immer eine Kunst. Wem es gelingt, der teilt sein geheimes Erfolgsrezept seinen Freunden mit wie der Chefkoch eines Feinschmecker-Restaurants seine neueste kulinarische Schöpfung.

Mehrere der heute existierenden Nannoplanktonarten vermehren sich nicht weiter, wenn der pH-Wert des Wassers unter 7,5 sinkt. Heute – und dies war vermutlich auch vor der endkreidezeitlichen Katastrophe der Fall – hat das Wasser erst unterhalb einer Tiefe von 1000 Metern einen derartigen Säuregehalt; in diesem Tiefenbereich aber lebt kein Plankton mehr. *Foraminiferen* reagieren auch auf andere chemische Veränderungen sehr sensibel. Zu viele Nitrate unterbinden ihre Fortpflanzungsfähigkeit ebenso wie zu viel Säure.

Und nun stelle man sich das Szenarium vor: Zuerst kam die Finsternis und das Massensterben. Dann kehrt das Licht zurück, doch die Oberflächen-gewässer des Meeres sind bereits übersäuert, weil durch die fehlende Biomasse des Planktons das vorhandene, im Wasser gelöste Kohlendioxyd nicht mehr verbraucht wird, so daß es zu einer ungewöhnlichen Konzentration von Kohlensäure kommt. Hinzu kommt eine Billion Tonnen Salpetersäure aus dem sauren Regen und aus den «Abwässern» der Kontinente. Damit wäre der pH-Wert des oberflächigen Meerwassers beträchtlich unter 7,5 abgesunken und hätte – abgesehen von ein paar ganz besonders widerstandsfähigen Planktonarten – alle diese Lebewesen daran gehindert, sich zu vermehren. Bei dieser drastisch veränderten Meereschemie blieb es dann vermutlich einige Jahrtausende, weil die Fortpflanzungsrate des Planktons niedrig blieb und weil sich das Wasser zu einem «Strangelove-Ozean» homogenisierte, in dem sich korrosives Wasser vom Meeresgrund immer wieder mit Wasser der Meeresoberflächenbereiche vermischte.

Irgendwann kam durch natürliche Prozesse im Ozean alles wieder ins Lot. Kalk neutralisiert Säure. Die Kreide auf dem Grundbesitz von Charles Lyell wurde abgebaut und verkauft – sie diente als natürlicher Ausgleich, um den sauren Boden in den Sumpfgebieten Nordenglands zu neutralisieren; noch heute streut man Kalk auf Rasenflächen, wo immer es sauren Boden gibt. Die Erosion von Kalkgesteinen an Land sowie die Auflösung von Kalziumkarbonatskeletten auf dem Meeresboden führten schließlich dazu, daß es im Meer genügend Kalk gab, um das Übermaß an Säure im «Strangelove-Ozean» zu neutralisieren. Nach Tausenden, ja vielleicht gar Zehntausenden von

Jahren hätten in den oberen Meeresschichten wieder viele Arten von Plankton existieren können, doch der Schaden war nun einmal da und nicht wieder gutzumachen. Nicht einmal eine schlafende Zyste bringt es fertig, ein Jahrtausend lang ihre Fortpflanzungsfähigkeit zu bewahren. Das Massenaussterben des Nannoplanktons war, dies leuchtet ein, die unausweichliche Folge der chemischen Veränderung.

Wenn wir nur über die Dinosaurier ebensoviel wie über das Plankton wüßten, dann könnten wir mit den Fingern die Umweltveränderung greifen, die sie fortpflanzungsunfähig machte oder – wie Heinrich Erbens Arbeit über fossile Dinosauriereier vermuten läßt – andere krankhafte Störungen ihrer Fortpflanzungsfähigkeit hervorrief. Leider haben sie keine Nachkommen hinterlassen, die wir im Laboratorium züchten könnten. Deshalb ist es vielleicht am besten, wenn wir von dem ausgehen, was am nächsten liegt und wovon alle sprechen: vom Wetter!

Die Temperaturveränderungen nach dem Einschlag eines Riesenmeteoriten sind eine höchst komplizierte Sache. Cesare Emiliani und seine Kollegen gingen von einem dreistufigen Denkmodell aus.

Die unmittelbaren Auswirkungen des Meteoriteneinschlages wären fast genau so, wie de Laubenfels sie in lebhaften Farben schilderte. Allerdings irrte er sich, als er eine um den ganzen Erdball rasende Druckwelle glühend-heißer Gase annahm. Im Einschlaggebiet freilich wäre es zugegangen wie im biblischen Sodom und Gomorrha. Ein gigantischer Feuerball wäre als Säule aus Rauch und glühendheißer Luft in den Himmel gestiegen und hätte die Form eines gewaltigen Rauchpilzes angenommen. Als der Einschlag erfolgte, gab es sicherlich auch heiße Stürme und Waldbrände, die vollständig unkontrolliert um sich griffen. Doch auch eine solche Temperaturstörung wäre zeitlich und örtlich begrenzt geblieben.

Dies gilt aber nicht für die zweite Stufe, die dem gefürchteten «nuklearen Winter» entsprochen hätte. Physiker aus den USA, der Sowjetunion, der Bundesrepublik Deutschland und anderen Ländern haben der Welt jüngst die Folgen eines Atomkrieges so drastisch vor Augen geführt, daß einem das Blut in den Adern gefrieren kann. Wenn zahlreiche Atombomben abgeworfen würden, würden die durch die typischen Atompilz-Wolken in die Stratosphäre getragenen Rauch- und Staubpartikel eine dicke Schicht schwebender Materieteilchen bilden und die Sonneneinstrahlung beeinträchtigen. Ohne die Sonneneinstrahlung würde die Erdtemperatur jedoch um Dutzende von Graden absinken. Boden und Gewässer würden gefrieren, kein Getreide würde mehr wachsen, und die meisten Überlebenden der nuklearen Katastrophe würden an Kälte und Hunger sterben. Einen sehr milden Vorge-schmack von Temperaturstürzen, die durch in die Erdatmosphäre geschleuderten Staub hervorgerufen werden können, erhielt die Welt nach einigen gewaltigen Vulkanausbrüchen des vergangenen Jahrhunderts. Der in der Stratosphäre schwebende Staub hätte in den Monaten nach dem Einschlag eines riesigen Meteoriten bewirkt, daß es keinen Sommer gab. Wie Brian Toon

in Snowbird darlegte, könnte die Temperatur mancherorts um bis zu 40 Grad Celsius gefallen sein. Ganz gewiß jedenfalls lag sie unter dem Gefrierpunkt. Am meisten Lebewesen starben in den Gebieten, wo eigentlich Sommer hätte sein sollen. Nur dort war die Sterblichkeitsquote niedriger, wo der katastrophengebendte Winter mit dem natürlichen Winter zusammenfiel. Tiere, die die Tropensonne gewohnt waren, mußten nun also in der Kälte zittern, wenn sie den Temperatursturz überhaupt überlebten.

Ein dem «nuklearen Winter» ähnlicher, katastrophengebender Winter aber kann nicht lange gedauert haben, denn nachdem sich der ausgeworfene Staub wieder gelegt hatte, brach die Sonne durch das Gewölk und brachte der Erde von neuem Wärme und Licht. Deshalb wollen wir nicht vorgreifen, bis die geologischen Befunde den Beweis für ein so kurzfristiges Ereignis geliefert haben. Immerhin deuten die Sauerstoffsotopendaten aus unseren Kernen aus dem Südatlantik auf eine jahrhundertelange Phase der Abkühlung nach jenem Ereignis hin, das die Iridiumanomalie hervorgerufen hatte. Diese lange Periode kälteren Klimas war nicht identisch mit dem «nuklearen Winter» unmittelbar nach der Katastrophe, doch sicherlich gehörte sie zu seinen Folgewirkungen. Falls der Meteorit in den Ozean gestürzt war, muß es darüber hinaus wochenlang täglich an die 5 Meter Niederschläge gegeben haben. Wenn wir uns nun vor Augen halten, daß gerade damals der gewaltige Temperatursturz stattfand, so dürften diese Niederschläge nicht als Regen, sondern als Schnee in der polarnachtähnlichen, frostklirrenden Finsternis gefallen sein. Jeder Zoll (2,54 cm) Regen entspricht etwa 25,4 cm Schnee. Die Erde muß also ein riesiger Schneeball gewesen sein, als die Sonne wieder zu scheinen begann. Wissenschaftler des Wetterdienstes der USA haben festgestellt, daß früher Schneefall meist einen strengen Winter nach sich zieht, weil das schneebedeckte Land mehr Sonnenenergie in den Weltraum zurückwirft als schneelose Flächen, die nicht so stark reflektieren. Die Auswirkung frühen Schneefalls dauert nur einen Winter lang, doch der Wärmeverlust infolge einer Schneedecke über weiten Gebieten des Globus, die in dem kalten Klima nur zögernd schmilzt, könnte sich durchaus über mehrere hundert Jahre hingezogen haben. Wenn nicht alles trügt, deuten unsere Werte auf eine solche Klimaentwicklung.

Daß schließlich abermals ein Klimawechsel stattfand, nämlich eine weltweite Erwärmung, ergibt sich aus den Daten, über die Shackleton 1978 referierte. Sie lassen sogar den Schluß zu, daß auch am Meeresboden eine Erwärmung von 5 Grad stattgefunden haben muß. Wir fanden in unseren Sedimentproben aus dem Südatlantik sogar Anhaltspunkte für eine Erwärmung um 8 Grad.

Emiliani beschwor den Treibhaus-Effekt, um die Erwärmung zu erklären. Kohlendioxyd in der Atmosphäre wirkt ganz ähnlich wie das Glasdach eines Gewächshauses. Sowohl das Glas als auch das Gas lassen zwar Sonnenlicht durch, doch nicht die Wärmestrahlen, die von der Erde in den Raum zurückgeworfen werden. Die auf solche Art «eingefangene» Wärme heizt die Atmosphäre auf und erhitzt nach und nach den gesamten Erdball. Üblicher-

weise sind die Veränderungen des Kohlendioxydgehaltes in der Atmosphäre zu geringfügig, um nennenswert Wirkung zu zeigen. Doch in jüngster Zeit stellten Klimatologen voller Besorgnis fest, daß der Kohlendioxydgehalt der Luft während des letzten Jahrhunderts um 20 % zugenommen hat. Ursache ist die beständig zunehmende Verbrennung fossiler Brennstoffe, um unseren Wärme- und Energiebedarf zu decken. Während der letzten Jahrzehnte ergab die Zunahme sogar eine Exponentialkurve. In nicht allzu ferner Zukunft könnte sich der Gehalt der Atmosphäre an Kohlendioxyd verdoppelt haben, was zu einer weltweiten Erwärmung um 2 Grad Celsius führen würde. Schließlich könnte die auf dem Globus «eingefangene» Wärme sogar die Eiskappen der Polarregionen zum Schmelzen bringen. Dadurch wiederum würde der Meeresspiegel soweit ansteigen, daß sämtliche Küstenstädte der Welt in den Fluten versanken.

Dinosaurier haben natürlich weder Schornsteine noch Auspuffrohre. Es war das Meeresplankton, das während mehrerer Millionen Jahre der vorindustriellen Zeit bestimmte, wieviel Kohlendioxyd in der Atmosphäre vorhanden war. Je mehr das Plankton von diesem Gas verbrauchte, desto weniger gab der Ozean an die Atmosphäre ab. Je weniger Plankton vorhanden war, um Kohlendioxyd zu verbrauchen – und in den ersten Jahrtausenden des Tertiärs war es gewiß wenig –, desto mehr Kohlendioxyd sammelte sich in der Atmosphäre an. Nach Broeckers Schätzung könnte sich das Kohlendioxyd in der Atmosphäre um den Faktor 3 vermehrt haben, und zwar als Folge des Massensterbens von Plankton und dessen langfristiger Minderung der Fortpflanzungsfähigkeit. Eine solche Verdreifachung hätte nach verschiedenen Computerberechnungen weltweit zu einem Temperaturanstieg zwischen 2 und 5 Grad geführt. Eine Rückkehr zu normalen Temperaturen war erst möglich, als der Ozean allmählich wieder fruchtbarer wurde und die überlebenden Planktonarten ihn neu bevölkerten. Unsere Kernproben deuten darauf hin, daß der Übergang von den schwer geschädigten Resten kreidezeitlicher Arten zu einer Population tertiärer Arten mit normaler Dichte mindestens 50 000 Jahre dauerte.

Plötzliche Temperaturwechsel konnten sich auf die Tiergemeinschaften an Land verheerend auswirken. Ein Drittel der nordamerikanischen Säugetierarten starb in den Jahrtausenden nach der Eiszeit aus. Allerdings sind wir in diesem Falle nicht ganz sicher, ob der Temperaturanstieg allein die Schuld hatte.

Dewey McLean, der stets der Ansicht war, daß Erwärmung die entscheidende Rolle beim Aussterben der Dinosaurier spielte, erörterte die Auswirkung ungewöhnlich hoher Temperaturen auf die Fortpflanzung der «Schreckensechsen»: Ein Anstieg der Temperatur um wenige Grade brachte vielleicht keinen Dinosaurier um, könnte jedoch viele von ihnen unfruchtbar gemacht haben. Ein Massensterben war nicht unmittelbar für ihr Aussterben als Art verantwortlich, aber Massensterilität könnte zu ihrem schließlichen Ende geführt haben. Noch überzeugender war die Ansicht von Zoologen, die

sich auf das Studium der Brutgewohnheiten von Reptilien spezialisiert hatten. Bei vielen Reptilienarten sind es nicht Chromosomen, die das Geschlecht des einzelnen Tieres bestimmen, sondern es hängt von der Bruttemperatur ab, ob die Nachkommenschaft männlich oder weiblich ist. So könnte man sich eventuell vorstellen, daß die letzten Dinosaurier alle das gleiche Geschlecht hatten. Sie gingen zugrunde, weil sie keinen Nachwuchs mehr zeugen konnten. Leider werden wir nie erfahren, ob dies zutrifft.

Zwar können wir sowohl über die Beeinflussung der Umwelt durch das Plankton als auch über die Beeinflussung des Planktons durch die Umwelt spekulieren, weil wir eine Menge über lebende Planktonorganismen wissen. Dies gilt aber nicht für *Ammoniten*, *Belemniten* und *Rudisten* – und auch nicht für die so eindrucksvollen Dinosaurier und Riesenreptilien, die seit ihrer Entdeckung im 19. Jahrhundert geradezu als Inbegriff ausgestorbener Tierarten gelten. Keines dieser Tiere können wir untersuchen, um unsere Fragen zu beantworten. Wir können nicht mehr überprüfen, wie weit sie fähig waren, Hitze, Kälte, Säuregehalt, die Luftverschmutzung oder andere Veränderungen ihrer Umwelt zu ertragen.

Im Juni 1985 traf ich bei einer Konferenz in Berlin anlässlich einer Forumdiskussion mit einer Gruppe von Ökologen und Paläontologen zusammen. Es ging um das Massenaussterben von Tierarten. Im Verlaufe der Konferenz kristallisierte sich der Gedanke heraus, man müsse das Problem gewissermaßen von zwei Ebenen aus betrachten: Es gibt unmittelbare Anlässe für das Aussterben, die für jede Tierart andere sein mögen, und es gibt tiefere Ursachen, die vielleicht letztlich für das Aussterben vieler Arten verantwortlich sind. Erst kürzlich entdeckte man, daß Raben das einzige Paar Eier verschlungen hatten, das wildlebende Kondore in Kalifornien gelegt hatten. Mag sein, daß es Raben sind, die das Buch über die letzte Generation dieser herrlichen Vögel schließen, doch die Zerstörung ihres Lebensraumes, nicht die Räuberei der Raben ist die tiefere Ursache der Gefährdung dieser und vieler anderer heutiger Tierarten. Ausgehend von Studien über erst jüngst ausgerottete Tierarten, stimmten die Ökologen in Berlin darin überein, daß die Zerstörung des Lebensraumes im Kontext mit anderen Störungen, die zum Rückgang der Populationsziffer, zur Einschränkung der genetischen Variabilität und zur Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit führen, die tieferen Ursachen für das Aussterben von Arten sind.

Doch wenn man andererseits um die Ursachen weiß, ist noch nicht notwendigerweise klar erkennbar, was denn wirklich unmittelbarer Anlaß für das Aussterben war. Es ist sehr wohl bekannt, daß Wandertauben ausgestorben sind, weil man sie zu intensiv jagte. Doch sie hatten als Art einen ganz bestimmten Punkt, an dem sie sehr verwundbar waren: Eine wichtige Voraussetzung für die Paarung war bei ihnen, daß sie sich in großen Schwärmen zusammenfanden. Die kleinen Grüppchen der die Jagd überlebenden Tiere aber waren nicht mehr imstande, eine angemessene Nachkommensrate zu erzielen: Ihre Dezimierung hatte zu einem für die Art tödlichen Eingriff in das Paarungsverhalten geführt. Manche Pflanzen – und Gartenbesitzer in

städtischer Umgebung wissen dies – sind gegenüber der Umweltverschmutzung dermaßen empfindlich, daß man sie innerhalb städtischer Ballungsgebiete nicht mehr züchten kann. Andere Pflanzen dagegen, dies haben Wissenschaftler erst jüngst herausgefunden, sind gegen die Luftverpestung nicht nur resistent, sondern reinigen sogar die Luft von Giften wie Kohlenmonoxyd, Formaldehyddämpfen und Zigarettenrauch. Wenn wir die tiefere Ursache der kreidezeitlichen Katastrophe kennen, so kann doch die schwere und langfristige Zerstörung des Lebensraumes, die dem Meteoriteneinschlag folgte, nicht das Aussterben einer ganz bestimmten Tier- oder Pflanzengruppe erklären, wenn wir nicht deren besondere Schwachstellen kennen.

So könnten die *Ammoniten* Opfer des Zusammenbruchs der Nahrungskette gewesen sein. Andererseits könnte die Umweltverpestung sie fortpflanzungsunfähig gemacht haben. Tropische Rifferbauer – Korallen und *Rudisten* – verschwanden vielleicht ganz plötzlich während des langen Winters, der auf die kurze Dunkelheit folgte, wenn sie nicht langsam erstickten, als den flachen Gewässern der Sauerstoff ausging. *Brachiopoden* wurden vielleicht vergiftet, als ihr sauberes, kalkhaltiges Umfeld, das sie zum Leben brauchten, zu einem trüben Schlammpfuhl wurde.

Alle Szenarios scheinen möglich, wenn es um das Aussterben der Dinosaurier geht: Die Dinosaurier glichen einander wohl so, wie heute die Säugetiere einander gleichen, nämlich gar nicht. Forscher, die heute eine Gruppe dieser fossilen Riesen untersuchen, können sehr wohl allzu brüchige oder unbefruchtete Eier entdecken und eine Fortpflanzungsstörung infolge exzessiver Hitze diagnostizieren. Andere dagegen, die sich mit einer anderen Sauriergruppe befassen, entdecken überhaupt keine Eier – weder vom Ende der Kreidezeit noch aus irgendeiner Zeit – und vermuten vielleicht, daß ihre Gruppe gar keine Eier legte, sondern lebende Junge gebar. Um das Aussterben einer bestimmten Saurierart zu erklären, müßten wir zahlreiche Fakten über ihre Physiologie und ihr Verhalten kennen, denn ohne dieses Wissen können wir nicht sagen, wo ihre Schwäche lag.

Auch wenn wir keine Details kennen, ist doch unser Forschen nach den Ursachen ihres Unterganges keineswegs umsonst. Noch vor wenigen Jahren verstieß jede Vorstellung, die man sich vom Ende der Dinosaurier machte, gegen die menschliche Vernunft. Alle, die sich mit der Materie befaßten, vergaßen, die Fülle jener Organismen ins Auge zu fassen, die gemeinsam mit den «Schreckensechsen» zugrundegingen, was wiederum nur geschehen konnte, wenn es eine weltweite Störung gab, die noch vor kurzer Zeit die Vorstellungskraft der meisten Wissenschaftler überstiegen hatte.

Wir haben heute ein klareres und konturenreicheres Bild des Massenaussterbens. Makaber ist freilich, daß unsere eigenen Verstöße gegen die Welt, in der wir leben, der Preis waren, den wir zahlen mußten, um zu dieser Erkenntnis zu gelangen. Wir selbst haben Arten ausgerottet, Länder entwaldet, Luft und Wasser übersäuert und verschmutzt, die Ozonschicht mit Aerosolen bedroht, den Treibhaus-Effekt ausgelöst und sogar mit dem Ge-

danken gespielt, einen nuklearen Winter hervorzurufen – es sind diese Dinge, die uns die Möglichkeit einer weltweiten Katastrophe nahebrachten, die frühere Generationen reinen Gewissens ignorieren konnten.

Wir haben unserem Planeten derartige Risiken zugemutet, weil wir miteinander konkurrierenden Wertvorstellungen anhängen, die wir als Ausdruck unserer naturgegebenen Überlegenheit ansehen, und von denen wir glauben, sie seien von dem «Naturgesetz» abgeleitet, wonach der «Tüchtigere» überlebt. Doch bevor der Mensch die Erde betrat, gab es ganz andere Gründe für das Aussterben von Arten. Das Massensterben ganzer Arten war die Folge drastischer Veränderungen in der Natur, und es war kein Lebewesen, das sie zum Nachteil anderer heraufbeschworen hätte.

Deshalb müssen wir am Ende unserer Darlegungen die schon eingangs gestellte Frage wiederholen: Ist der Darwinismus eine Wissenschaft? Da wir heute begriffen haben, was es bedeutet, wenn der Tod vom Himmel fällt – stellt diese Erkenntnis den wissenschaftlichen Wert des Darwinismus nicht in Frage?

Nicht den Helden gehört der Sieg

Als ich Paläontologie studierte, brachte man mir Darwins These vom Überleben des Tüchtigsten anhand der Vorgeschichte Südamerikas nahe. Vor ein paar Jahrmillionen hatten sich Nord- und Südamerika auf sehr lange Zeit voneinander getrennt. Auf beiden Teilkontinenten hatte sich eine artenreiche Tierwelt entwickelt, die jeweils von der des anderen Teilkontinentes völlig verschieden war. Als sich dann der Isthmus (die Landenge) von Panama aus dem Meer erhob, wanderten Tiere aus Nordamerika in Südamerika ein.

Die Neuankömmlinge, geprägt von der Härte des Klimas im Norden, waren den langsameren, weniger entwickelten einheimischen Tierarten überlegen, deren Entwicklung auf ihrem Inselkontinent lange gedauert hatte. Es überrascht nicht, wie die Geschichte endete: Die unterlegene einheimische Tierwelt wurde weitgehend von den überlegenen Einwanderern ausgerottet. Viele Gruppen heute lebender Tiere, die man als typisch südamerikanische Tiere betrachtet, so beispielsweise Lamas, Jaguare und Tapire, sind in Wahrheit Nachkömmlinge von eingewanderten Tierarten aus dem Norden. Nur ein paar primitiven Säugern aus Südamerika, wie dem Gürteltier und dem Opossum, gelang es, auf dem Nordteil des amerikanischen Doppelkontinentes Fuß zu fassen.

Nach Darwins Ansicht war die natürliche Zuchtwahl etwas Kreatives. Er begriff sehr wohl: Wenn die Natur nur die Rolle eines Vollstreckers spielte, und den Tüchtigsten das Leben ermöglichte, indem sie alle umbrachte, die von der für ihre Nische bestmöglichen Anpassung abweichen, so wäre das von ihm postulierte Naturgesetz der natürlichen Zuchtwahl schließlich auf eine Geschichte des Lebens hinausgelaufen, die der Auffassung der Kreationisten (der Anhänger der biblischen Schöpfungslehre) nahe gekommen wäre. Mit anderen Worten: Wäre jede Tierform vollkommen erschaffen worden und hätte Darwins «Naturgesetz» nur bewirkt, daß der Fortbestand der Vollkommenheit gewahrt blieb, dann wären die Arten in der Tat unveränderbar und es gäbe keine Erklärung für die Fakten der Evolution, die Darwin bei seinen Studien an ausgestorbenen oder noch lebenden Tierarten beobachtet hatte.

Daher war Darwins Argumentation komplexer: Die natürliche Zuchtwahl erhöhe die Lebenstüchtigkeit eines Organismus, der sich, wenn auch mit geringfügigen Unterschieden, bei jedem Wechsel, dem er unterworfen ist, jener Beschaffenheit näherte, die es ihm möglich mache, die ihm zu Gebote stehenden Ressourcen auf Kosten seiner Konkurrenten zu seinem eigenen Vorteile zu nutzen. Die Geschichte des Lebens wäre also eine Geschichte allmählicher, schrittweiser Vervollkommnung. Würde man unsere heutigen

Pflanzen und Tiere zurück in die Zeit der Dinosaurier versetzen, dann würden sie die älteren Erdenbewohner vertreiben, so wie die überlegenen Tiere Nordamerikas die unterlegenen Tiere des Südkontinents vertrieben hatten, als Nord- und Südamerika sich wieder vereinigten.

Diese Auffassung der Evolution als «Verbesserung der Natur» war für Darwin unausweichlich, weil er ganz der Analogie des Populationsdruckes verhaftet war. Nach seiner Vorstellung war der Konkurrenzkampf zwischen den Organismen das Prinzip, das die Evolution bestimmte und in Gang hielt. Entwickelte also ein Raubtier bei der Jagd auf Beute eine höhere Geschwindigkeit als andere, mußten auch andere beim Beutefang entweder rascher werden oder, wenn sie sich nicht änderten, untergehen.

Selbst heute noch sehen sogar sehr prominente Biologen keine Alternativen zu diesen Thesen. In einer Ausgabe von *Nature* aus dem Jahre 1984 drückte John Maynard Smith, ein Populationsgenetiker, der bei der Entwicklung einer modernen Synthese zwischen der Theorie Darwins und den Mechanismen der heutigen Genetik eine zentrale Rolle spielt, seine Überraschung darüber aus, «daß Paläontologen den fossilen Befund anders deuten. Die Dinosaurier, so glauben sie, sind aus Gründen ausgestorben, die wenig mit dem Konkurrenzkampf zwischen ihnen und den Säugetieren zu tun hatten. Erst in der Folge des Aussterbens der Saurier hätten sich die Säugetiere verbreitet, um das entstandene Vakuum zu füllen, obwohl sie selbst doch ebenso alt sind wie die Dinosaurier. Das gleiche allgemeine Muster, so meinen sie, gelte auch für andere bedeutende Artenwechsel.» Er dagegen hätte «erwartet, daß eine bedeutende Ursache des Aussterbens der Konkurrenzkampf mit anderen Arten war».

Ich selbst begann erst die Ideologie des kontinuierlichen Fortschritts durch Konkurrenzkampf in Frage zu stellen, als ich mich für das Problem des Massenaussterbens zu interessieren begann. Als ich 1980 von meiner Südatlantik-Expedition zurückkehrte, fing ich an, mich gegen die Lehre von der Evolution zu immer höherer Perfektion aufzulehnen. Denn die Beweise für eine ganz und gar vom Zufall abhängige Katastrophe waren erdrückend. Konnte man nun angesichts dieser Fakten tatsächlich von natürlicher Zuchtwahl sprechen – und wenn: Nach welchen Gesichtspunkten mußte man die Überlegenheit der Überlebenden beurteilen? Ich beschloß, mich bei meinem Freunde, dem Paläontologen Stephen Gould, sachkundig zu machen.

Gould war ich erstmals 1972 begegnet. Ich nahm in Oxford an einer Konferenz teil, und er verbrachte dort einen Studienurlaub. Wir kannten einander dem Namen nach und durch unsere wissenschaftlichen Arbeiten. Er wußte von meinen Forschungen im Mittelmeer, die meinen Glauben an den Aktualismus Lyells erschüttert hatten, und auch er hatte an Lyells Dogma des Aktualismus Kritik geübt. Nicht weniger entschieden als Einsteins Zitat «Gott spielt nicht mit Würfeln» ist Darwins Wort *Natura non facit saltum* («die Natur macht keine Sprünge») zu verstehen. Gould dagegen hatte Beweise gefunden, daß die Natur doch Sprünge macht. Er hatte festgestellt, daß im

Fossilienbefund eine bestimmte Art Millionen von Jahren unverändert erscheinen kann, bis sie ganz plötzlich verschwindet und von einer neuen Art abgelöst wird, die natürlich mit ihr verwandt, aber doch auch völlig anders ist. «Gradualismus», so betonte Gould, «ist ein kulturbedingtes Vorurteil, keine naturbedingte Tatsache». Zusammen mit einem Kollegen, Niles Eldridge, erfand er den Terminus *punctuated equilibrium* («Gleichgewicht mit Unterbrechungen»), um die sprunghafte Art von Entwicklung zu kennzeichnen, so wie er sie sah.

Zu meiner Genugtuung bezweifelte Gould auch die Entwicklungsgeschichte der südamerikanischen Säuger, so wie man sie mir während meiner Studienzeit beigebracht hatte. In einem mit «Grab, wo ist dein Sieg?» überschriebenen Artikel publizierte er die jüngsten Untersuchungsergebnisse von Wissenschaftlern der Chicagoer Universität, wonach der Austausch zwischen Nord- und Südamerika doch nicht ganz so eindeutig war.

Zwar ist es richtig, daß Angehörige von 14 nordamerikanischen Säugetierfamilien schließlich eine neue Heimat südlich von Panama fanden und 40 % der Gesamtzahl der auf dem Südkontinent vertretenen Familien repräsentierten, doch umgekehrt wanderten auch 12 Familien aus Südamerika nach Norden, wo ihr heutiger Anteil an der Gesamtzahl der Säugetierfamilien 36 % beträgt. Die Zahlen sind also in etwa ausgeglichen, denn in Nordamerika starben annähernd gleich viele Gattungen aus wie im Süden. Gould kommentierte dieses Resultat: «Die alte Geschichte des ›Heil! Der siegreiche Eroberer kommt!‹ – mit Wellen unterschiedlicher Wanderungsbewegungen und anschließendem Massengemetzel – läßt sich nicht aufrecht erhalten.»

Allerdings ließ die neue Untersuchung vermuten, daß die in den Süden eingewanderten Nordamerikaner in ihrer neuen Heimat zahlreiche neue Arten hervorbrachten, die Auswanderer aus dem Süden sich dagegen im Norden nur zu ganz wenigen neuen Arten weiterentwickelten. Gould vermutete, dieser Unterschied gehe auf einen zufälligen Klimawechsel in Südamerika zurück. Die verhältnismäßig junge Auffaltung der Anden habe einen großen Teil Südamerikas gegen den Regen aus dem pazifischen Raum abgeschirmt und aus dampfenden Urwäldern, an welche die einheimische Tierwelt angepaßt war, ausgetrocknetes Waldland, Savannen und Wüsten werden lassen. Viele der ganz an den Urwald angepaßten Säuger waren bereits ausgerottet oder standen kurz vor dem Aussterben, als die Invasion aus dem Norden stattfand. Die Arten aber, die in den Norden abwanderten, waren durch das dort trockenere Klima ebenso gehandikapt, wie sie es durch das trockener werdende Klima im Süden gewesen wären.

Andererseits waren die aus dem Norden stammenden Tierfamilien wohl schon in ihren früheren Lebensräumen an Bedingungen gewöhnt, die denen ähnelten, die sie nun in ihrer neuen südamerikanischen Heimat vorfinden sollten. Es waren also Klimaveränderungen, nicht der Konkurrenzkampf zwischen den Arten, die die bessere Erklärung für den Fossilienbefund des Aussterbens und der Artenneubildung abgaben.

Solche erfrischenden Gedankengänge waren also das beherrschende Element der Arbeiten Goulds, seit wir einander erstmals in Oxford begegnet waren. In den folgenden acht Jahren hielten wir unsere Freundschaft auch durch einen gelegentlichen Briefwechsel aufrecht. Als ich nun erkannte, daß nicht nur eine «Unterbrechung», von der Gould gesprochen hatte, sondern der Beginn eines ganz neuen Kapitels den Anfang des Känozoikums markierte, meinte ich, ich sollte ihn dies wissen lassen. Vielleicht würde er mir zustimmen, daß Darwin sich geirrt hatte, als er die Vermutung äußerte, das Überleben des «Tüchtigsten» bestimme den Gang der Evolution. Ich schrieb Gould im August, nachdem ich von meiner Südatlantik-Expedition zurückgekehrt war, und fragte, was das plötzliche Aussterben all der Geschöpfe zu bedeuten habe, die in der Kreidezeit die Erde bevölkert hatten. Gegen wen hatten sie gekämpft? Warum waren sie nicht überlebenstauglich?

Goulds Antwort verblüffte mich. In einem langen und gedankenschweren Brief bekräftigte er leidenschaftlich seinen Glauben an die natürliche Zuchtwahl und teilte mir mit, dies sei Darwins bedeutendster Beitrag zur wissenschaftlichen Lehre von der biologischen Evolution. Es sei kein Grund vorhanden, die Bedeutung dieser Lehre zu leugnen, auch wenn es Umweltkrisen gegeben habe.

Um seinem Brief mehr Nachdruck zu geben, fügte er ein Exemplar eines seiner Bücher bei, das einen warnenden Aufsatz über «Darwins vorschnelle Beerdigung» enthielt. Dieser Aufsatz setzte sich kritisch mit einem Artikel auseinander, der «Darwins Irrtum» hieß, und den Tom Bethell 1976 in *Harper's Magazine* veröffentlicht hatte. Bethell hatte behauptet, Darwins Theorie befände sich am Rande des Zusammenbruchs («die natürliche Zuchtwahl wurde vor ein paar Jahren sogar von ihren glühendsten Verehrern stillschweigend aufgegeben»), weil sie nicht mehr sei als eine Tautologie. Gould widersprach in beiden Punkten. Eine Tautologie ist die Bezeichnung eines Sachverhalts durch mehrere gleichbedeutende Begriffe. «Mein Vater ist ein Mann», so Gould, sei eine Tautologie, weil nun einmal ein Vater zwangsläufig männlichen Geschlechtes sei. Der Satz sage also nur aus, was ohnehin auf der Hand liege und enthielte keinerlei neue Information. «Die Überlebenstauglichsten überleben» schien Bethell ebenfalls eine derartige Tautologie zu sein, weil es sich bei Überlebenden ohnehin von selbst verstünde, daß sie überlebenstauglich sind (oder in der Sprache der Populationsgenetiker: Der Genotyp mit der höchsten Überlebensrate wird als der Überlebenstauglichste definiert). Ein Organismus erweist sich eben dadurch als überlebenstüchtig, daß er überlebt.

Bethell beanstandete diesen «Denkfehler» Darwins anhand einer fehlerhaften Analogie. Das erste Kapitel aus «*On the Origin of Species*» handelt von der Taubenzucht. In der künstlichen Zuchtwahl durch die Taubenzüchter, die aus der einen wilden Art der Felsentaube die sehr unterschiedlichen Varianten der Pfauentaube, der Tümmeler, Kropftaube und Brieftaube züchteten, erblickte Darwin eine Entsprechung zu der Zuchtwahl der Natur, die aus einer bestimmten Ursprungsart verbesserte Arten schafft. Der Fehler

dieser Analogie besteht darin, daß zwar Taubenliebhaber im voraus das Ziel im Auge haben, das sie durch ihre Auslese erreichen wollen, und so über unabhängige Kriterien verfügen, an denen sie den Fortschritt ihrer Zucht messen können, die Natur dagegen keinerlei Ziele hat, keine unabhängigen Kriterien kennt, und man daher nicht sagen kann, inwiefern sich die Organismen, so sehr sie sich verändern mögen, auch «verbessert» haben.

Gould dagegen vertrat die Ansicht, daß es ein unabhängiges Kriterium gebe. Wenn es nämlich zu einer Veränderung der natürlichen Lebensbedingungen komme, wie beispielsweise durch das Auffalten der Anden, ganz abgesehen von den kleineren Veränderungen, die sich überall auf dem Erdball ergeben, könne er sich Organismen vorstellen, die unter den veränderten Verhältnissen besser oder schlechter zum Überleben geeignet seien. Er bestritt nicht – wie es meiner Ansicht nach Darwin tat –, daß es eine Art von «höherer Instanz» im Kosmos gebe, sondern fand in dem Gedanken, daß ein übergeordneter Plan sich den neuen, lokalen Bedingungen anpasse, gerade die «Perle» der Weisheit Darwins. «Diese Eigenschaften», so schloß er, «weisen die Überlebenstauglichkeit jener Art von Vorstellungen zu, die ein Baumeister von einem guten Entwurf hat, und nicht allein der empirischen Tatsache, daß sie tatsächlich überlebten und sich verbreiteten. Es wurde kälter, bevor das Mammut sein zottiges Fell entwickelte».

Auf dieser Basis schien ihm der Gedanke der Überlebenstauglichkeit vertretbar. Wenn wir wüßten, daß es kälter wird, könnten wir voraussagen, daß diejenigen Arten überleben würden, die sich in ihrer Entwicklung der Kälte anpassen können. Gould ist aber von der Voraussetzung ausgegangen, daß die Umwelt sich langsam verändert. Wenn jedoch die Eiszeit mit der Geschwindigkeit eines Kometeneinschlages über die Erde hereingebrochen wäre – wer hätte dann Zeit gehabt, Pelze zu entwickeln? Ich war von den Argumenten Goulds nicht überzeugt.

Gould hatte allerdings recht, davon bin ich überzeugt, wenn er Bethells zweiter Behauptung entgegentrat, Darwins Theorie befände sich «am Rande des Zusammenbruchs». Das Konzept der natürlichen Zuchtwahl sei nicht «stillschweigend aufgegeben» worden. Tatsächlich sind die Verfechter der natürlichen Zuchtwahl sehr zahlreich und lautstark. Auf Aussagen der Schöpfer des Neodarwinismus zurückgreifend, äußerte Gould beipflichtend, die natürliche Zuchtwahl sei «von Dobzhansky mit einem Komponisten, von Simpson mit einem Dichter, von Mayr mit einem Bildhauer sowie von Julian Huxley mit einem einzigen Menschen, nämlich Mr. Shakespeare» verglichen worden. Diese prominentesten unter den Evolutionsbiologen – und Gould selbst – suchten durch solche Vergleiche «das Wesen des Darwinismus zu illustrieren – die Kreativität der natürlichen Zuchtwahl».

Daß dermaßen leidenschaftliche Glaubensbekenntnisse auch unter weniger bekannten Biologen ihre Wirkung nicht verfehlten, wurde mir klar, als ich nach Berlin eingeladen worden war, um dort bei der Auswahl der Teilnehmer für eine Konferenz über Evolution behilflich zu sein. Es überraschte

mich, dort einen glänzenden jungen Genetiker gegen die Teilnahme eines Kollegen argumentieren zu hören, daß dieser nicht an die natürliche Zuchtwahl glaube. Beim Frühstück fragte ich den jungen Professor, warum er so rigoros sei. Als gäbe es gegen die Theorie der natürlichen Zuchtwahl keine andere Alternative als die biblische Schöpfungslehre. Mein Gegenüber berief sich auf Versuche der künstlichen Auslese unter Laborbedingungen sowie auf ein Experiment der Natur, das – passenderweise – unter jenen Finken stattgefunden hatte, die schon Darwin auf den Galapagosinseln studiert hatte und die seitdem den Trivialnamen «Darwinfinken» tragen.

Die Ergebnisse dieses Experiments waren in *Nature* unter dem Titel «Intensive Auslese der Natur in einer Population von Darwinfinken (*Geospizinae*) auf den Galapagos» veröffentlicht worden. Demnach war dieses Experiment eine perfekte Illustration für «das Überleben der Darwinfinken während einer Dürre auf der Insel Daphne Major, das kein Zufall war. Große Vögel, insbesondere männliche Exemplare mit langen Schnäbeln, überlebten am besten, weil sie am ehesten fähig waren, die großen und kleinen Samenkörner zu knacken, die während der Dürre ihre Hauptnahrung bildeten.»

Ich sagte zu meinem jungen Freund, daß ich nicht verstünde, was mit dem Überleben der großschnäbeligen Vögel bewiesen sei. Zufall sei eben Willkür ohne Ziel, Zweck oder Prinzip. Wenn der Autor des betreffenden Artikels meinte, die Auslese der Darwinfinken auf der fraglichen Insel sei kein Zufall gewesen, so hatte er doch wohl, wie mir schien, vorausgesetzt, daß die Zuchtwahl, die dort stattgefunden hatte, zielgerichtet sei und sich an einem bestimmten Prinzip orientiere. Ich könne dem Verfasser zustimmen, daß das Überleben der Exemplare mit den mächtigen Schnäbeln kein Zufall sei. Zweifellos nämlich eignen sich derartige Schnäbel besser dazu, harte Nüsse zu knacken. Doch was bedeutete «nicht zufällig» im Zusammenhang mit einer Dürre? Ist Dürre nicht schon ihrerseits eine Laune der Natur? Und ist Anpassung, die es ermöglicht, eine Dürreperiode zu überleben, ein besonderes Zeichen von Überlebensfähigkeit? Wie stünde es denn um die «Überlebensfähigkeit» der großschnäbeligen Vögel, wenn sich das Klima genau nach der entgegengesetzten Richtung hin änderte, so daß es keine Dürre mehr gäbe? Ist eine solche Auswahl ebenso ein Schöpfungsakt, wie wenn ein Bildhauer ein Bildnis der Venus schafft und ganz allmählich, Schlag für Schlag, die Gestalt der Göttin aus dem Stein herausarbeitet?

Als chinesischer Fatalist konnte ich in all dem nur ein Spiel des Zufalls erkennen. Zufällig gab es Dürre auf Daphne Major. Zufällig gab es großschnäbelige Vögel, die überlebten, weil sie sich von großen, harten Samenkörnern ernährten. Was ist kreativ an der Auswahl einer Eigenschaft, die vielleicht so an den Augenblick gebunden sein mag wie das Wetter? Auf anderen Inseln überlebten andere Finken, weil es dort eine ganz andere Abfolge von Zufällen gab.

Ich ließ mich auf ein Spiel mit Wortbedeutungen und Tautologien ein und äußerte: Natürlich kann man den Zufall als Extravaganz der Natur betrachten und zufällige Auslese wäre dann eben natürliche Auslese. Die

Überlebenden – auch so könne man die Sache sehen – hätten eben einfach besonderes Glück gehabt. Aber sie sind nicht notwendigerweise die Überlebenstüchtigsten. Was würde aus ihnen, wenn es regnete?

Mein neodarwinistischer Freund war nicht begeistert. Seit im 20. Jahrhundert Gregor Mendels Arbeiten über die Vererbungsmuster neuentdeckt worden waren, und man in den fünfziger Jahren sogar den Code der Gene entziffert hatte, lagen für die Wissenschaftler die Mechanismen der Evolution offen. Man konnte Experimente machen und Beobachtungen anstellen, die präziser waren als alles, was Darwin sich hätte träumen lassen. Genetiker fanden heraus, daß Eigenschaften durch Gene vererbt werden und daß die Varianten innerhalb einer Population das Ergebnis unterschiedlicher Genkombinationen sind. Eine große Population mit einem großen Genreservoir hat daher das Potential für ein sehr breites Variationsspektrum. Außerdem können sich Gene plötzlich und radikal durch Mutationen verändern, die – zumindest im Laboratorium – durch Bestrahlung ebenso hervorgerufen werden können wie durch andere Faktoren – beispielsweise durch Umweltgifte. Diese Ergebnisse können schon nachdenklich stimmen.

Bei künstlicher Auslese im Laboratorium – mein Gesprächspartner erwähnte Versuche mit Fruchtfliegen – kann man Individuen, die eine spezielle, genbedingte Eigenschaft oder eine bestimmte Mutation aufweisen, aussondern und miteinander züchten. Wird eine solche Züchtung lange genug vom Rest der Population isoliert, kann – zumindest theoretisch – eine neue Art entstehen. Wissenschaftler, so erklärte mir mein neuer Freund allen Ernstes, haben bisher solche Gruppen nur so lange gezüchtet, bis neue Varietäten, aber keine neuen Arten entstanden sind. Die Natur allerdings habe dies getan, und zwar vor so kurzer Zeit, daß sich die Evolution zweifelsfrei dokumentieren lasse.

Er berichtete von folgendem Beispiel: Die Vorfahren zahlreicher Pflanzen und Tiere, die heute auf den Hawaii-Inseln heimisch sind, wurden dort erst vor ein paar Millionen Jahren isoliert. Weil es ihnen unmöglich war, sich mit ihren Verwandten auf dem Festland zu kreuzen, entwickelten sie neue Arten, die nirgendwo sonst existierten. Um seinem Argument noch mehr Überzeugungskraft zu geben, fügte er noch andere «Arpartheids»-Mechanismen hinzu, die ebenfalls zu Isolierung und infolgedessen zur Artenneubildung geführt hatten.

All das erklärte er mir geduldig, wie eben ein junger Mann, der mitten im «wirklichen Leben» steht, seinen Eltern oder Lehrern erklärt, was Leben heißt. Ebenso pflegen schon seit langer Zeit Biologen, die die Evolutionslehre vertreten, Phänomene des gelebten Lebens geduldig den Paläontologen zu erklären, die ständig nur mit toten Lebewesen zu tun haben – mit Truhen voller Knochen, Schubläden voller Muschelschalen und Sammlungen von Fossilien. Die Gegenwart sei der Schlüssel für die Vergangenheit. Experimente wie die Laborversuche mit den Fruchtfliegen simulierten die Natur so genau, daß mein Gesprächspartner sich frage, ob ein Evolutionsbiologe alles über die Geschichte des Lebens wissen müsse, die sich in den Fossilien abzeichnet.

Geowissenschaftler müßten sich also Selbstvorwürfe machen, weil sie so abgrundtief unwissend sind. Die Paläontologie, die dem Studium der Erde die Dimension der Zeit hinzufügte, nahm im 19. Jahrhundert eine zentrale Stellung als Bindeglied zwischen der Geschichte der Urzeit und der wissenschaftlichen Erforschung der andauernden Evolution ein, die sie vielleicht zu erhellen vermochte. Der Lehrstuhl für Paläontologie war der erste Lehrstuhl zahlreicher geologischer Institute in Europa. Von den ersten dreißig Empfängern der begehrtesten und ehrenvollsten Auszeichnung für Leistungen auf dem Gebiete der Geologie, der Wollaston-Medaille, leisteten mehr als die Hälfte – von William Smith (1830) bis hin zu Charles Darwin (1859) – bedeutende Beiträge zur Paläontologie. Unter den letzten dreißig Empfängern aber befand sich nur noch ein einziger Paläontologe.

Nach der Jahrhundertwende kam es dann zu einem steilen Abstieg. Die Studenten lernten, Versteinerungen zu klassifizieren und zu identifizieren, die sich als nützlich für die relative Chronologie geologischer Formationen erwiesen, und obwohl diese Aufgabe gut gelöst wurde, stritten Paläontologen sich noch immer um so aufregende Dinge wie die Frage, ob eine bestimmte Grenze zwischen zwei geologischen Formationen 2 Meter höher oder 1 Meter tiefer liegen solle, während andere Geologen ihre Aufmerksamkeit dramatischen Neuerungen wie Geophysik, Geochemie, Ozeanographie und Plattentektonik widmeten. An manchen Universitäten wurde Paläontologie überhaupt nicht mehr gelehrt, und die Evolutionstheorie wurde aus dem Lehrplan für Geologiestudenten gestrichen. Oder wie John Maynard Smith es formulierte: «Die Haltung der Populationsgenetiker gegenüber jedem Paläontologen, der so tollkühn war, einen Beitrag zur Evolutionstheorie anzubieten, war, ihm zu sagen, er solle sich wegpacken, noch ein Fossil finden und die Erwachsenen nicht stören.»

Doch ein Versuch, den Ursprung der Arten durch rein rationale Einsichten in die Genetik zu verstehen, läßt sich mit dem Unterfangen vergleichen, den Ursprung der Nationen zu erklären, indem man die Disziplinen der Soziologie und der Massenpsychologie bemüht. Der Ursprung der Nationalstaaten liegt in der Geschichte. Keine sozialwissenschaftliche Forschung kann erklären, warum die Nordwestgrenze zwischen der Schweiz und Frankreich mitten durch die Jurahöhen verläuft und Menschen voneinander trennt, die eine und dieselbe Sprache sprechen und zur selben Kirche gehen. Nur das Studium der Geschichte verdeutlicht, daß der Erwerb der Berner Juraregion durch die Schweiz eine Entscheidung war, die eine Gruppe von Politikern 1815 auf dem Wiener Kongreß traf – eine historische Tatsache, die nur aus der Geschichte der Napoleonischen Kriege erklärbar ist.

Auch der Fortbestand der Nationalstaaten läßt sich allein aus ihrer individuellen Geschichte erklären. Keine Theorie hätte voraussagen können, daß ausgerechnet Liechtenstein ein souveräner Staat blieb, während Dutzende andere Feudalterritorien ihre Unabhängigkeit verlieren sollten. Ganz ge-

wiß wäre es hier falsch gewesen zu behaupten, die Überlebenden seien die Tüchtigsten gewesen.

Wenn wir die Entwicklung der Arten, so wie wir sie heute kennen, erklären wollen, ist zwar das Wissen um gewisse Mechanismen recht hilfreich, aber die Kenntnis ihrer Geschichte ist unverzichtbar. Auch die Nationen, so wie wir sie heute kennen, haben gewiß ihre Entwicklungen durchlaufen, und die unterschiedlichsten Wissenschaftszweige lassen Mechanismen vermuten, die einige Aspekte ihrer Evolution verständlich machen, doch jede hat ihre eigene Geschichte mit Pestepidemien, Kriegen, wirtschaftlichen oder ideologischen Krisen, ohne deren Kenntnis all unser Wissen nichts wert ist. Ganz entsprechend können wir den Ursprung und das Aussterben von Arten nicht verstehen, wenn wir den Fossilienbefund ignorieren und die Realität biologischer Krisen leugnen.

Und was berichtet uns der geologische Befund über das Aussterben von Arten in der Geschichte des Lebens? In seiner Ansprache, die er 1982 als Präsident an die Geologische Gesellschaft von Amerika richtete, faßte Digby McLaren zusammen, worin Paläontologen sich einig sind. Es gab das Phänomen der Massensterbens mehrfach in der Geschichte des Lebens auf Erden; die Katastrophe am Ende der Kreidezeit ist nur das jüngste Ereignis dieser Art.

Stets findet man dabei das gleiche Muster. Große Gemeinschaften unterschiedlicher Organismen werden ausgelöscht und durch neue Gemeinschaften von geringer Artenvielfalt und hoher Individuenzahl ersetzt. McLaren betonte das Tempo dieses Massenaussterbens. Es kommt nach langen Perioden, in denen sich in der Evolution der Organismen offenbar nichts Dramatisches ereignete, relativ plötzlich. Die abrupt ausgelöschte Population wird «unmittelbar» – für einen Geologen wie McLaren bedeutet dies: innerhalb von ein paar tausend Jahren – durch eine Population ersetzt, die so groß ist wie die ursprüngliche, doch erst nach ein paar Jahrmillionen haben sich neue Arten entwickelt. Erst allmählich wird jene Artenvielfalt wieder erreicht, wie sie ursprünglich vorhanden war. Für einen Geologen oder Paläontologen geht auch dieser Grad von Artenneubildung innerhalb von ein paar Millionen Jahren noch immer sehr schnell vor sich.

Dieses Muster der Artenneubildung und des Aussterbens unterscheidet sich ganz und gar von jenem, das Darwin zu sehen glaubte und das seinerseits auf Malthus' Muster von Populationswachstum und Wachstumsminderung zurückging. Es gibt keine Zunahme der Arten bis zu ihrem Aussterben, und es gibt vorher keinerlei Anhaltspunkte für einen eskalierenden Lebenskampf. Anders als in Malthus' Welt, in der Populationswachstum zu Konflikten und Problemen führt, wurde die Geschichte des Lebens durch Ereignisse geprägt, die zum allgemeinem Untergang bestimmter Arten und nachfolgend zur explosiven Ausbreitung neuer Formen geführt haben. Erfolgreiche Vermehrung geht dem Unglück nicht voran – sie folgt ihm. Wie bei dem Baby-Boom nach dem Zweiten Weltkrieg ist die Zunahme der Fruchtbarkeit die Folge, nicht die Ursache der Katastrophe.

Viele Paläontologen unterstützen die Nischentheorie der Evolutionslehre. Es gibt nur eine begrenzte Anzahl von Nischen auf Erden, und sie werden von einer begrenzten Zahl von Arten bewohnt. Sind sämtliche Nischen besetzt, verlangsamt sich die Evolution. Doch wenn eine Katastrophe eintritt, und die Bewohner vieler Nischen getötet werden, beginnt ein neues Gerangel um den Lebensraum. Dieses Modell erinnert an den Zustand nach dem Abwurf einer Neutronenbombe, die zwar Gebäude intakt läßt, aber ihre Bewohner umbringt. Nach einem Massenaussterben sind die Gebäude, die die früheren Arten bewohnten – die Prärie, die Wüste, Waldgebiete, Küstengebiete usw. –, leer und können neue Bewohner aufnehmen. Die dann folgende explosive Artenneubildung füllt diese leerstehenden «Gebäude» mit neuen Einwohnern.

In Wirklichkeit freilich ist dieses Szenario doch nicht ganz so simpel. Viele der Nischen, die vor der Katastrophe bewohnt waren, haben zu existieren aufgehört. Beispielsweise verschwand die Nische für Parasiten, die sich ganz auf Dinosaurier als Wirtstiere eingestellt hatten, als die Dinosaurier ausstarben. Ebenso verhielt es sich mit zahlreichen anderen Nischen, die innerhalb des komplexen Gewebes von Beziehungen zwischen den Organismen bewohnt gewesen waren. Die Wechselbeziehungen zwischen den Organismen sind die Vorbedingung, die zuallererst eine Artenvielfalt ermöglicht. Zur Nische eines Raubtieres gehören die besonderen Eigenschaften und Verhaltensweisen der Beutetiere, von denen es lebt. Zur Nische des Löwenzahns gehören die Menschen, die den Boden freilegen, auf dem er sich ansiedelt. Allerdings kommen im Gefolge einer Katastrophe auch neue Nischen bzw. neue «Wohnungen» auf den Markt, die jedoch langsamer bezogen werden als die leeren Altwohnungen. Haben sich die Wohnungen mit «Pionierarten» wieder aufgefüllt, schafft die zunehmende Komplexität ihrer Wechselbeziehungen schließlich wieder eine neue Vielfalt, die die vor der Katastrophe existierende Artenvielfalt noch überhelfen wird.

Nach einer Katastrophe lassen sich die sich neu entwickelnden Populationen, die von den überlebenden Arten abstammen, in keiner Weise mit den ausgestorbenen Arten vergleichen, deren natürlichen Lebensraum sie übernommen haben. Sie sind nicht überlebenstüchtiger, sondern am Anfang sehr simpel. Diesen «Pionieren» folgen Abkömmlinge desselben Stammes, die in dem Maße, wie sie sich spezialisieren, eine Vielzahl vorher leerstehender «Wohnräume» zu besetzen beginnen. Auch sie sind nicht notwendigerweise die Geeignetesten für die betreffenden Nischen, doch sie sind ganz einfach die ersten. So ist es ebenso unmöglich zu sagen, daß die neu entwickelten Arten von *Foraminiferen*, die dort auftreten, wo einst ihre kreidezeitlichen Vorgänger gelebt hatten, überlebenstüchtiger waren, wie es absurd wäre zu behaupten, Wale seien dem *Mosasaurus* überlegen. Als die Mosasaurier in der kreidezeitlichen Katastrophe zugrundegingen, blieb sowohl ihr Lebensraum im Meer als auch ihre Rolle als Fischfresser unbesetzt. Als sich dann 10 Millionen Jahre später die Wale entwickelten, taten sie dies sozusagen auf einer «leeren Bühne».

Vielleicht ist die Evolution ja kreativ, aber die Natur, die Schöpferin, arbeitet wohl nicht so, wie Darwin es sich vorstellte, indem sie langsam, aber unbeirrbar, aus jedem Marmorblock die Form meißelt, die am perfektsten einem vorgegebenen Schema entspricht. Ich stelle mir die Kreativität der Natur eher wie die Phantasie einer impulsiven Autorin vor, die man auf einen Macintosh-Computer losläßt. Sie hämmert wie wild in die Tasten und füllt beinahe das gesamte Gedächtnis ihrer MacWrite-Diskette. Danach bastelt sie eine ganze Weile hier und da am Text herum, streicht ein Wort und ersetzt ein anderes durch einen neuen Begriff von gleicher Bedeutung. Dann findet sie eines Tages, daß ihre Diskette durch Zufall gelöscht wurde, und alles muß – fast ohne Vorgabe – von neuem anfangen.

Der neue Entwurf mag besser sein als der alte oder auch nicht. Auf jeden Fall ist er anders, denn die Autorin hat einfach ihren Text neu geschrieben. Er stimmt mit dem alten nur innerhalb der Grenzen überein, die durch den Wortschatz und das Wissen der Autorin gezogen sind, was sich wiederum mit den Grenzen der Genetik, den Methoden der Evolution und der «Grammatik» der Beziehungen zwischen den Organismen und ihren Lebensbereichen vergleichen läßt.

Wissenschaftler, die derartige «Manuskripte» zu entziffern versuchen, sind natürlich verblüfft. Wir finden aufeinanderfolgende Entwürfe mit völlig verschiedenen Inhalten. Darwin «löste» das Rätsel zu seiner Zufriedenheit, indem er annahm, daß die für seine Theorie notwendigen Zwischenstufen – beispielsweise die Entwicklung spätmesozoischer zu frühkänozoischen Lebensformen – im paläontologischen Befund fehlen. Zwar ist dieser Befund ohne Frage lückenhaft, insofern sich einzelne Seiten oder auch ganze Paragraphen der «Manuskripte» vermutlich nie wiederfinden lassen, doch neues Material gibt uns die Gewißheit, daß wenigstens nicht ganze Kapitel fehlen. Es gab den von Darwin vorausgesetzten Übergang nie. Und bei Gubbio klappt keine Lücke.

Wie McLaren in seinem Vortrag darlegte, bestreiten heute nur noch wenige Autoren, daß es das Massenaussterben gab, obwohl sich die Gelehrten noch nicht über die Anlässe und die tieferen Ursachen einig sind. Doch gewiß nur wenige betrachten den Lebenskampf zwischen Organismen als Ursache für das Aussterben oder erwägen ernsthaft, daß die Säugetiere mit den Dinosauriern um ihr Leben oder um ihre jeweiligen Nischen kämpften. Doch ein überzeugter Darwinist mag vielleicht noch immer versuchen, die These seines Lehrmeisters mit dem Argument zu stützen, die Formel «Überleben der Tüchtigsten» bezöge sich auf die Fähigkeit, eine Krise durchzustehen.

Ich erinnere mich an die «Kleinen Wasserbären», die Gould in einem seiner Aufsätze beschrieb. Es sind Winzlinge, weniger als einen Millimeter groß, die irgendwie wie Insekten aussehen. Ihren einprägsamen Namen erhielten sie von dem deutschen Naturforscher Goeze, der sie 1773 entdeckte, sich über ihre Klassifikation den Kopf zerbrach und sie dann kurzerhand «Wasserbären» taufte. Inzwischen wurden mehr als vierhundert Arten dieser

Schalentiere beschrieben, die eine verwirrende Vielzahl von Nischen von der Arktis bis zur Antarktis und von hohen Berggipfeln bis hinab zur Tiefsee bewohnen. «Kleine Wasserbären» überleben Extremsituationen, indem sie in einen tiefen Schlaf verfallen. In diesem Zustand nehmen sie keinerlei Nahrung zu sich. Sie können Temperaturen überleben, die den Siedepunkt des Wassers übersteigen, desgleichen Temperaturstürze bis zu 0,0008 Kelvin, bis nahe an den absoluten Nullpunkt also. Sie vermögen auch Strahlung auszuhalten, die das Tausendfache der für Menschen tödlichen Dosis beträgt. Und, so schrieb Gould, sie können aus hundertjährigem Schlaf erwachen, wie ein Museumskurator entdeckte, als er ein Stück völlig vertrockneten Mooses aus seiner Sammlung anfeuchtete. Wenn die Fähigkeit zum Überleben das Grundkriterium der Lebenstüchtigkeit ist, so sind die «Kleinen Wasserbären» die Tüchtigsten und Tauglichsten von uns allen – aber ist dies die Richtung, der Zweck und die Vollkommenheit, welche die natürliche Zuchtwahl anstrebt? Zum Glück ist dies nicht der Fall.

Was aber ist dann Lebenstüchtigkeit? Angepaßt sein. Angepaßt woran? An seine Nische. Was aber geschieht, wenn die Nische zerstört wird? Dann bleibt die Art schutz- und hilflos zurück. Die Dinosaurier mögen in hohem Maße lebensfähig gewesen sein, jeder auf seine Weise, und Überlebensfähige in der natürlichen Umwelt, die sie bewohnten. Dann schlug der Meteorit ein, die mächtigen Tiere wurden ihrer Lebensbedingungen beraubt und gingen unter. Das Wort «Lebenstüchtigkeit» verliert seinen Sinn, wenn die Rahmenbedingungen, aus denen sich dieser ergibt, nicht mehr stimmen.

Damit kommen wir wieder auf unsere Frage zurück, ob die natürliche Zuchtwahl ein Naturgesetz oder eine Ideologie ist. Bei Poppers Falsifikationstest und an der Fähigkeit gemessen, die Vergangenheit zu interpretieren, fällt die Theorie durch. Selbst wenn wir alles über die letzten Tage der bei Maastricht gefundenen Flora und Fauna wüßten, ja wenn wir Filme über das Leben der Dinosaurier und *Ammoniten* sähen und im kleinsten Detail ihre Lebensweise auf der damaligen Erde studierten – wir könnten doch nicht auf ihren Untergang schließen. Vor Katastrophen gibt es einfach keine Warnung, und keine Theorie kann hinreichend erklären, was sich wirklich ereignete. Wir können auch nicht die These von der Unfruchtbarkeit derjenigen, die ausstarben, oder von der Überlegenheit derjenigen, die überlebten, falsifizieren. Um es mit den Worten der Kreationisten zu sagen: «Es ist unmöglich, ein wissenschaftliches Experiment zu beschreiben», vor allem eines, das jenes Ereignis wiederholt, welches der Kreidezeit ein Ende bereitete.

In der Tat: Wir können nicht beweisen, daß ein Organismus nicht lebensfähig ist, es sei denn, er stirbt aus. Doch können wir auch keinem Organismus attestieren, er sei lebensfähig, wenn wir ihn nicht unter normalen Lebensbedingungen beobachtet haben. Wir können nur glauben (und nicht beweisen), ein *Mosasaurus* sei nicht hinreichend geeignet gewesen, Fische im offenen Ozean zu erbeuten, und wir können ebenso glauben, daß das Säugetier, das sehr viel später zum Wal wurde, diese Aufgabe besser

erfüllte. Doch derartige Deutungen haben nichts mit Wissenschaft zu tun. Gäbe es auch heute noch Mosasaurier, wäre ihr Fleisch vielleicht weniger schmackhaft und ihr Tran für Menschen weniger wertvoll. Dafür hätten sie möglicherweise mehr Ruhe als die in ihrem Bestand gefährdeten Wale. Dies sind nun eben die Extravaganzen der Evolution!

Wahrscheinlich ist jede Form des Aussterbens – auch der kontinuierlich durch alle Zeiten hindurch stattfindende Prozeß des «Hintergrund-Aussterbens» nicht weniger vom Zufall abhängig, nicht vorhersagbar und hat insgesamt so wenig mit Überlebensfähigkeit zu tun wie das Massenaussterben durch eine unvorhersehbare Katastrophe. Schließlich befindet sich alles stets im Wandel, und ein gewisser Prozentsatz der «Lebensfähigen» wird stets zu «Lebensunfähigen», wenn die Veränderungen zu rasch vor sich gehen, so daß den betreffenden Organismen keine Zeit bleibt, eine neue Nische zu finden. Doch es ist das Massenaussterben der Arten, das unsere Aufmerksamkeit fesselt, zumal es sich bisher erst einige wenige Male in der Erdgeschichte ereignet hat.

Fast jeder größere Schnitt zwischen den Erdzeitaltern – wie beispielsweise zwischen dem Ordovizium und dem Silur, zwischen Perm und Trias – ist durch das Aussterben zuvor blühender Lebensgemeinschaften und den Aufstieg nicht minder blühender neuer Gemeinschaften gekennzeichnet. Der plötzliche Übergang vom Paläozoikum zum Mesozoikum läßt etwa dasselbe Muster erkennen wie der vom Mesozoikum zum Känozoikum, doch damals war das Ausmaß des Sterbens noch viel größer. Tatsächlich verschwanden vor 250 Millionen Jahren 95 % der paläozoischen Arten. Sehr früh im Paläozoikum, am Beginn des Kambriums (vor 560 Millionen Jahren), zeigt der Fossilienbefund eine erstaunliche, fast explosive Zunahme der schalentragenden Lebensformen. Entweder existierten in der Zeit vorher sehr viel weniger Arten von Lebewesen oder viele der damals existierenden Organismen besaßen keine Schalen und sind daher nicht mehr nachweisbar. Jedenfalls haben wir wenig Material, das uns erkennen läßt, was damals geschehen war. Entsprechend dem aus anderer Zeit bekannten Muster muß der dramatischen Artenneubildung ein nicht minder dramatisches Artensterben vorangegangen sein.

Als ich noch Student war, interpretierte Steve Stanley von der Johns-Hopkins-Universität die prähistorische Katastrophe anhand der Nischentheorie, so wie man sie damals verstand, als sich der Begriff Nische mehr auf das Umfeld als auf die Lebensweise bezog. Aus seiner Sicht war die präkambrische Welt mit Algen bedeckt, die die Entwicklung anderer Gruppen von Lebewesen, die den zur Verfügung stehenden Raum besser genutzt hätten, verhinderten. Er dachte dabei an einen einzelligen Algenfresser, der alle Algenteppiche abgeweidet und so Nischen für mehrzellige Tiere geschaffen hätte. Grundlage für Stanleys Vorstellungen war das Ökologen wohlbekannte «Ernteprinzip». Ein Ökosystem, das den Nahrungserwerb erleichtert, sei es nun ein Überflutungstümpel in der Gezeitenzone oder eine Steppe in Afrika, erlaubt eine größere Vielfalt von Lebensformen als ein von Muscheln

oder einer ganz bestimmten Grasart überwuchertes System. Der winzige Algenfresser, so vermutete Stanley, machte daher die kambrische Explosion von Lebensformen möglich. Nach Stephen Gould war dieses Geschöpf der «unbesungene Held in der Geschichte des Lebens».

Ärgerlich an dieser glänzenden Idee war nur: Der «Held» hatte keinerlei Knochen hinterlassen, und es ist daher unwahrscheinlich, daß man ihn je nachweisen wird. Nur ein paar primitive Muscheln hatte man in Felsformationen gefunden, die älter als das Kambrium waren. Doch 1947 machte ein australischer Kollege eine aufsehererregende Entdeckung in den Ediacara-Bergen in Südastralien. Dank besonders günstiger Konservierungsbedingungen fand er dort zahlreiche, 600 Millionen Jahre alte Fossilien von Organismen mit weichen, schalenlosen Körpern: Einige wirkten wie Medusen und waren wahrscheinlich Quallen, andere anscheinend Würmer und Algen, doch daneben gab es noch weitere seltsame Wesen, die keinem anderen lebenden oder ausgestorbenen Organismus glichen, den wir bis dahin kannten. Inzwischen fand man ähnliche Assemblagen weicheibiger Geschöpfe auch an anderen Orten in Australien, Südafrika, England, der Sowjetunion und Neufundland.

Wenn dies die Geschöpfe waren, die wir ins Auge zu fassen hatten, weil aus ihnen die schwindelerregende Vielfalt neuer Lebensformen im Kambrium hervorgegangen war, so kommen wir mit einem einzelligen «Helden» nicht aus. Derartige Winzlinge, so gefräßig sie auch sein mögen, verspeisen keine Quallen. Was also passierte mit der Tierwelt aus den Ediacara-Bergen, und warum ist es schwierig, sie mit späteren Lebensformen in Verbindung zu bringen?

Als ich 1981 nach China reiste, um dort an der Sechzigjahrfeier der Chinesischen Gesellschaft für Geologie teilzunehmen, traf ich meinen alten Freund C. C. Wu. Wu erzählte mir, Frank Asaro aus Berkeley habe eine sehr bedeutende Iridiumanomalie in einer Probe aus einem Horizont unmittelbar vor dem ersten Auftauchen der *Trilobiten* gefunden. *Trilobiten* sind urtümliche Gliederfüßler, die sich im Kambrium sehr stark verbreiteten und die explosionsartige Vermehrung anderer Schalentiere ankündigten. Es war eine wirklich aufregende Neuigkeit.

Eine Iridiumanomalie, das wußten wir damals schon, ist ein starkes Indiz für einen Meteoriteneinschlag auf der Erde. Vielleicht konnten wir eine Isotopenanalyse der Grenzformation zwischen Präkambrium und Kambrium vornehmen. Meine chinesischen Gastgeber waren sehr hilfsbereit und führten mich zur Schlucht des Jangtse Kiang in Zentralchina, an deren Wänden man die betreffende Schicht klar erkennen kann. Ich entnahm ihr sechs Proben für vorläufige Untersuchungen. Einen Teil davon sandte ich an Urs Krähenbühl nach Bern. Meine Assistentin, Hedi Oberhänsli, half mir, indem sie eine massenspektrometrische Untersuchung vornahm.

Die Ergebnisse freuten uns. Wir fanden die Iridiumspitze, die auf einen Meteoriteneinschlag hindeutete, desgleichen die negative Kohlenstoffisoto-

penanomalie, die von einem nahezu sterilen Ozean zeugte. Beide Resultate entsprachen den an der Grenze zwischen der Kreidezeit und dem Tertiär vorgefundenen Begebenheiten unmittelbar vor einer Epoche mit geradezu fanatischer Artenneubildung.

Da wir es nicht bei den Resultaten aus nur sechs Gesteinssplittern bewenden lassen wollten, baten wir unsere chinesischen Kollegen um systematische Probenentnahmen. Sun Shu, der Direktor des Geologischen Institutes der Chinesischen Akademie der Wissenschaften, schickte uns zwei Serien grenzübergreifender Proben – eine von der Fundstelle am Jangtse Kiang, der ich die ersten sechs Gesteinssplitter entnommen hatte, die zweite aus einer Fundstätte in der Provinz Yünnan, die 1000 Kilometer weiter südlich liegt.

Hedi Oberhänsli analysierte die Proben in unserem massenspektrometrischen Labor und fand, was wir suchten: die Kohlenstoffisotopenanomalie, und zwar an beiden Fundstätten genau am Grenzhorizont. Der «unbesungene Held in der Geschichte des Lebens» war also, davon sind wir jetzt überzeugt, kein algenverzehrender Winzling, sondern ein voluminöser Besucher aus dem Weltraum. Zu seinen Opfern gehörte wahrscheinlich die Fauna der Ediacara-Berge. So gesehen, waren die dort nachgewiesenen Lebewesen die «Dinosaurier» ihrer Zeit.

Unsere chinesischen Kollegen hatten uns inzwischen die Ergebnisse ihrer Untersuchungen über einen anderen Grenzzort zwischen anderen Erdzeitaltern – dem Paläozoikum und dem Mesozoikum – mitgeteilt. Dort waren 95 % aller Arten ausgestorben. Viele sprechen im Zusammenhang damit von der schwerwiegendsten biologischen Krise, die es je gab. Die chinesischen Wissenschaftler setzten Neutronen als Detektive auf die Spur und waren so in der Lage, den Verdacht auszuräumen: Im «Grenztön», der das Perm, die letzte Periode des Paläozoikums, vom Trias, der ersten Phase des Mesozoikums, scheidet, fand sich eine Iridiumanomalie. Außerdem gab es in diesem Horizont eine negative Kohlenstoffisotopenanomalie. Damit haben wir das gleiche Muster geochemischer Veränderungen für alle drei Grenzbereiche, die die drastischsten Wenden der Evolution in der Geschichte des Lebens auf der Erde markieren.

Das Wort «Katastrophe» kommt aus dem Griechischen. *Katástrophē* bedeutet wörtlich «Wende nach unten». Jeder dieser größeren Meteoriteneinschläge gab der Evolution eine andere Richtung, von den fremdartig anmutenden flachen Wesen der Ediacara-Berge zu den schalentragenden und durchgeformten Organismen des Kambriums, von der Welt der Dinosaurier zu der Tierwelt, in der Säugetiere die beherrschende Rolle spielen. Es fällt schwer, sich vorzustellen, daß wir die entscheidendsten Veränderungen in der Geschichte des Lebens dem reinen Zufall verdanken. Auch wenn Kollisionen unseres Planeten mit Meteoriten bloße Launen der Natur zu sein scheinen (und auch wenn ihre unmittelbaren Folgen für das Leben auf Erden chaotisch ist) – liegt ihnen nicht dennoch ein bestimmtes Muster zugrunde? Wenn Geschichte sich wiederholt, wiederholt sie sich mit einer bestimmten Regelmäßigkeit?

David Raup und John Sepkowski sind der Ansicht, dem mehrfachen Massenaussterben läge ein bestimmter Zyklus zugrunde. Zusätzlich zu den erwähnten größeren Phasen des Massenaussterbens, anhand deren wir heute Erdzeiträume voneinander unterscheiden, gab es eine Reihe weniger spektakulärer Fälle von Artensterben, die immerhin bedeutend genug waren, um sich im Fossilienbefund abzuzeichnen. Wissenschaftler der Universität Chicago gaben einen Überblick über die letzten 250 Millionen Jahre und verzeichneten darin, daß alle 26 Millionen Jahre eine noch heute nachweisbare Katastrophe stattgefunden hat. Die letzte ereignete sich vor 14 Millionen Jahren.

Walter Alvarez und Richard Muller verglichen dieses Zeitschema mit Untersuchungsergebnissen, die aus Kratern von Meteoriteneinschlägen aus dem gleichen Zeitraum gewonnen wurden. Nur wenige von ihnen lassen sich gut datieren, doch gab es eine gewisse Annäherung: Größere Meteoriteneinschläge scheinen sich etwa alle 28,4 Millionen Jahre zu ereignen. Der jüngste von Raup und Sepkowski fixierte Zeitraum eines Massensterbens fiel mit einem Meteoriteneinschlag zusammen, der vor 14 Millionen Jahren nahe der Stadt Nördlingen (im Nördlinger Ries) in Süddeutschland stattgefunden hatte.

Die Ungenauigkeit der geologischen Datierungsmethoden macht bisher jede genau Zuordnung unmöglich, denn die radiometrische Datierung fossiler Schichten und von Meteoriten stammender Einschlagstrümmer kann um ein paar Millionen Jahre variieren. Allerdings sind Raup, Alvarez und andere inzwischen überzeugt, daß den Meteoriteneinschlägen eine gewisse Regelmäßigkeit zugrunde liegt und daß es die Gesetze der Himmelsmechanismen sind, von denen sie abhängen.

Es gibt viele solcher Rhythmen. Einer von ihnen ist ein 50-Millionen-Jahresrhythmus, den Clube und Napier in ihrem 1979 in *Nature* erschienenen Artikel als den denkbaren Grund periodischer Kometeneinschläge annahmen. Es war jener Artikel, der mich dazu brachte, meinen Hut in den Ring des Gelehrtenstreites um das kreidezeitliche Artenaussterben zu werfen. Offenkundig paßte dieses Intervall nicht zu Raups und Sepkowskis 26-Millionen-Jahreszyklus des Massenaussterbens. Ein anderer regelmäßiger Zyklus ergibt sich aus dem tänzelnden Auf und Ab unserer Sonne durch die Ebene unserer Milchstraße, doch diese «Tänzelbewegungen» finden alle 33 Millionen Jahre statt. Größte Publizität fand die ausgefallendste Theorie, die sensationelle Idee, daß ein verborgener Gefährte unserer Sonne mit dem ominösen Namen *Nemesis* die Störungen unter den Himmelskörpern hervorruft, die dann irdische Katastrophen heraufbeschwören. Als ich Ende 1985 Vater und Sohn Alvarez in Berkeley besuchte, teilten mir die beiden allerdings mit, daß ihre Kollegen «Tausende von Aufnahmen des Himmels» durchgesehen hätten, ohne auch nur eine Spur des angenommenen Phantoms zu finden.

Offensichtlich gibt es noch viele unbekannte Größen, die noch gründlicher Erforschung bedürfen, bevor wir die Evolution auf unserer Erde mit den Bewegungen der Himmelskörper in Einklang bringen können. Die Auf-

stellung von Zyklen für das massenhafte Sterben von Arten kann auch auf eine Fehldeutung der geologischen Befunde zurückzuführen sein. Die Periodizität der Einschlüge wurde auf der Grundlage zu weniger Daten behauptet; schließlich haben wir nicht den geringsten Beweis dafür, daß ein Stern namens *Nemesis* existiert. Ich teile daher die Ansicht von Gene Shoemaker, der diesem Gedanken eine Wahrscheinlichkeit von weniger als ein Prozent gibt, und würde eher Dawey McLean zustimmen, der diese Spekulationen schlicht Unsinn genannt hat. Übrigens ist dies auch gar nicht Gegenstand unserer Diskussion.

Selbst wenn wir entdecken sollten, daß die Erde regelmäßig von Meteoriten bombardiert wird, könnten wir keinerlei Voraussage hinsichtlich der dadurch hervorgerufenen Trends der Evolution treffen. Wie die Evolution sich nach einem Meteoriteneinschlag weiterentwickelt, hängt von der Größe des Meteoriten ab, von der Lage der Einschlagstelle, von der Jahreszeit und – dies ist besonders entscheidend und viel komplexer, als der neueste Supercomputer analysieren könnte – von den Folgen des Einschlags für die Gesamtheit der lebendigen Welt, in der alle Organismen voneinander abhängig sind.

Es ist Zeit, wach zu werden und die Absurdität des Gedankens der natürlichen Zuchtwahl zu erkennen. Ernst Chain, ein Nobelpreisträger für Biologie, hatte den Mut, offen zu bekennen: «Die Entwicklung und das Überleben des Lebenstüchtigsten zu postulieren ... scheint mir eine Hypothese, die durch keinerlei Beweise gestützt und mit den Tatsachen unvereinbar ist ... Es überrascht mich, daß sie so unkritisch und bereitwillig hingenommen wird, und dies schon so lange Zeit und von so vielen Wissenschaftlern, ohne daß auch nur eine Spur eines Protestes sichtbar wurde.»

Diese mit den Fakten unvereinbare Hypothese wurde meiner Meinung nach deshalb so widerspruchsfrei hingenommen, weil wir an sie glauben wollen. Das einzig Natürliche an dem sogenannten «Naturgesetz» vom Überleben des Tüchtigsten ist, daß es der menschlichen Natur entspricht. Wir sind aggressiv, wir töten andere Menschen und rotten ganze Arten aus. Oft genug empfinden wir bei solchen Handlungen auch noch Genugtuung. Doch die Geschichte des Lebens liefert keine wissenschaftliche Grundlage – weder für den Kapitalismus noch für den Sozialismus, schon gar nicht für all die nicht enden wollenden Revolutionen im Namen von Marxismus, Maoismus oder Rassismus. Die Annahme, daß es von der Natur «begünstigte Rassen» gäbe, die sich im Existenzkampf besser durchzusetzen wüßten als andere, war eine Spekulation, die zu einer gefährlichen Ideologie wurde. Wir sollten aufhören, ihr das Mäntelchen wissenschaftlicher Respektabilität umzuhängen.

Der Gedanke, es gäbe Vernunftgründe und letzte Zwecke, mag in unseren Grundvorstellungen von der Welt verankert sein, doch auch sie sind ein Kunstprodukt unserer eigenen, einzigartigen Evolution. Wenn die großen Ereignisse in der Geschichte des Lebens nichts als Produkte des Zufalls sind

(denn wie hätten die Säugetiere, von denen wir abstammen, eine Chance gehabt, wenn nicht die Dinosaurier von einem aus der Bahn geratenen Kometen umgebracht worden wären?), wie sollten wir dann ertragen, daß wir allem Anschein nach selbst nur ein Zufallsprodukt der Natur sind?

Es ist nicht leicht, nur Glück zu haben. Ich kenne das gut. Manche sagten mir, ich hätte Glück gehabt, als ich einen Autounfall überlebte, bei dem meine erste Frau ums Leben kam. War ich glücklich, daß ich am Leben geblieben war, oder war sie glücklicher als ich, weil sie starb und nicht den Schmerz des Verlustes ertragen mußte wie ich? Ein protestantischer Geistlicher besuchte mich und empfahl mir, in der Bibel die Briefe des Apostels Paulus an die Korinther zu lesen. Ich fand Trost in dem Gedanken, daß das Leben nichts sei als ein Dienst und der Tod ein Geschenk. Vielleicht hatte Ruth ihren Dienst bereits geleistet. Immerhin hatte sie drei liebenswerte Kinder geboren. Mit Glück oder Unglück hatte ich überleben sollen, um meine eigene Mission zu erfüllen.

Je älter ich werde, desto mehr fühle ich mich zu der Philosophie des Taoismus hingezogen, die mir vor so langer Zeit von meiner Mutter nahegebracht wurde. In der damaligen Welt beherrschte, zuerst unter fremder Besatzung, dann in einem weltweiten Krieg, der Kampf um die Existenz das gesamte Leben. Wir alle sind Kinder unserer Zeit und sehen die Welt durch die Brille unserer Erfahrungen. Als ich nach dem Kriege nach Amerika ging, um dort zu studieren, wurde ich, was meine Tochter einen *Fünfziger* nennt – ein «Leistungsmensch». Das war in den fünfziger Jahren. Wir alle orientierten uns damals sehr stark an dem Prinzip Leistung. Für die Hippies und Blumenkinder der sechziger Jahre war ich schon zu alt. Doch ihre Abwendung vom Geist des Darwinismus schien mir der hoffnungsvolle Beginn einer neuen Ära zu sein, eine neue Sicht des Lebens, die sich weit mehr in Übereinstimmung mit den taoistischen Traditionen befindet. Seit meiner Kindheit hegte ich diese Tradition in mir und nun begann sie erneut aufzukeimen.

Tao ist das chinesische Wort für «Weg». Wie es im Taoismus gebraucht wird, bedeutet es «Weg», «Prinzip», «Wahrheit». Diese Wahrheit jedoch ist verborgener als das, was der Westen unter «Wahrheit» versteht, und was doch nur «Übereinstimmung mit den Tatsachen» bedeutet. Karl Popper liebte es, den deutschen Humoristen Wilhelm Busch zu zitieren, den Schöpfer von «Max und Moritz»:

*Zwei mal zwei gleich vier ist Wahrheit.
Schade, daß sie leicht und leer ist,
Denn ich wollte lieber Klarheit,
Über das, was voll und schwer ist.*

Im Taoismus ist alles, was «nicht so leicht» ist, gleichzeitig seinem tiefsten Wesen nach dem Zugriff entzogen. Der erste Satz des *Tao Te Chin*, der «heiligen Schrift» des Tao, lautet: «Der Tao, über den man sprechen kann, ist kein wirklicher Tao.» Popper äußerte etwas ganz Ähnliches über die Wahrheit: Sie

sei etwas, das niemand zu finden wüßte. Er fügte hinzu, wir wüßten, daß es sie gebe, denn Falschheit sei leicht zu entdecken. Daß es Lügen gibt, beweist die Existenz der Wahrheit, wie sehr sie sich auch verbirgt. Ebenso beweist die Tatsache des Unglücks, daß es Glück gibt, obwohl sich auch Glück unserem Zugriff entzieht. Ich meine, wenn man so denkt, kann man akzeptieren, daß immer der Glücklichste überlebt. Es gibt einen Weg, ein Prinzip, eine Wahrheit für das, was sich auf unserer Erde ereignet hat, die nicht zu finden ist und über die man nicht sprechen kann.

Ich bin nicht so anmaßend zu behaupten, ich kenne den *Tao* der Evolution. Ich werde nicht versuchen, das Glück zu finden. Die Korintherbriefe verraten nichts über den Dienst der Dinosaurier an dieser Welt, obwohl ich es zu schätzen weiß, daß meine Existenz damit zu begründen ist, daß sie zu ihrer Zeit zugrunde gingen. Es muß ein *Tao* in der Evolution sein. Doch wenn wir darüber sprechen könnten, wäre es kein wirklicher *Tao*. Ich ziehe es vor, angesichts der Wahrheit aus der Enthüllung des Falschen Mut zu schöpfen. Der Untertitel des Darwinschen Werkes *«The Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life»* ist falsch, und falsch sind auch die Ideologien, die der Darwinismus hervorbrachte oder die ihn als Rechtfertigung benutzt haben.

Ich ziehe auch eine andere Sicht des Lebens vor als Darwin. In einer der letzten Konferenzen in Berlin ließ Karl Niklas von der Cornell-Universität die Geschichte der Evolution an uns vorbeiziehen, wie sie sich anhand fossiler Lebensgemeinschaften darstellt. Seine Schilderung betonte die evolutionären Zusammenhänge, innerhalb derer Erfindungskraft, Vielfalt und neue Möglichkeiten entstanden sind. Die ersten Organismen auf unserem Planeten lebten im Meer. Die wasserbewohnenden Gliederfüßler konnten sich zu landbewohnenden Insekten entwickeln, weil sie sich von den Algen ernährten, die aus dem Meer kamen und die feuchten Küstenstreifen zu begrünen begannen. Die Insekten wurden zur Nahrung ihrer Freßfeinde, aus denen allmählich die Spinnen hervorgingen. Dann wuchsen den Insekten Flügel, während Spinnen Netze zu spinnen lernten, als Pflanzen und Bäume immer mehr in die Höhe wuchsen. Insekten, die sich von Pollen und Nektar ernährten, ermöglichten es den Pflanzen, sie für die Bestäubung zu benutzen, und die daraus resultierende Vielfalt blühender Pflanzen schuf neue Nischen für Insekten, die neue Arten und Weisen erfanden, sich ihrer zu bedienen. Die Insekten wiederum schufen neue Nischen für Insektenfresser – nicht mehr nur Spinnen, sondern Amphibien, Reptilien und die ersten Säugetiere.

Dies ist nur ein ganz winziger Ausschnitt aus dem Befund. In den zahllosen Geschichten dieser Art, die sich aus dem Fossilienbefund und den Beziehungen innerhalb der lebenden Gemeinschaften ablesen lassen, sind die Wechselbeziehungen zwischen den Lebensformen der Faden, der sich durch alles zieht. Jeder Wandel einer Form verursacht Veränderungen in einem Netzwerk von Formen, die – alle zusammen – an dem als Leben bezeichneten Phänomen teilhaben. Kaum etwas deutet darauf hin, daß sich neue Gruppen bilden, die über die abgestorbenen hinweggehen werden. Eher ist es so, daß das Aussterben einer Form zur Krise auch für andere Formen wird, denn

einen Organismus, der nicht von anderen Organismen abhängig ist, gibt es nicht. Mag sein, daß eine Art von der Krise einer anderen auch profitieren kann wie vielleicht die Planktonart *Globigerina eugubina*. Doch man kann nicht sagen, daß die neuen Arten von *Foraminiferen* auf Kosten der alten überlebten.

Wenn eine solche Auffassung einen Blick auf den *Tao* – auf den Weg, die Wahrheit – der Evolution eröffnet, dann muß man sie wegen ihrer Schlichtheit schätzen. Wir können nicht sagen, ob Glück nur verschleiertes Unglück ist, denn so intelligent wir auch sind – es ist uns nicht gegeben, derartige Urteile zu fällen. Es hat Sprünge in der Evolution gegeben, und vielleicht spielt Gott sogar Roulette.

Das Jahrhundert nach der Veröffentlichung von Darwins «*On the Origin of Species*» war ein Zeitalter voll intensiver Kämpfe und Angst. Die Welt erlebte zwei Weltkriege und die Tyrannei manches totalitären Regimes. Mir scheint, je mehr wir unsere Überlegenheit hervorheben, über den Wert anderer Urteile fällen zu können oder unser Schicksal nach der einen oder anderen Vorstellung von Vollkommenheit auszurichten suchen, desto mehr Schaden richten wir an. Mit der altmodischen Weisheit meiner Mutter können wir aus der Geschichte des Lebens auf der Erde lernen. Ich glaube, wir müssen leben, ohne daß wir vorgeben zu wissen, wer oder was «lebenstüchtig» ist oder nicht. Statt dessen sollten wir die Vielfalt der Formen und Lebensweisen annehmen, die dem Leben selbst Nahrung geben. Wenn ich die paar Milliarden Jahre der Evolutionsgeschichte zurückverfolge, komme ich dem *Tao* unserer Existenz am nächsten.

Wiederum sah ich unter der Sonne, daß nicht den Schnellen der Preis zufällt, und nicht den Helden der Sieg, nicht den Weisen das Brot, noch den Verständigen der Reichtum, noch den Einsichtigen Gunst; sondern alle trifft Zeit und Zufall.

Literaturhinweise

Das vorliegende Buch wendet sich in erster Linie nicht an Wissenschaftler, sondern an breitere Leserschichten. Daher verzichtete ich auch auf die in wissenschaftlichen Publikationen übliche Angabe der Quellenbelege im Text. Statt dessen führe ich im folgenden eine Reihe von Veröffentlichungen an, die für unser Thema von besonderer Bedeutung sind. Diese kleine Bibliographie nennt die Quellen, aus denen ich geschöpft und in diesem Buche zitiert habe. Vor allem aber soll sie den Lesern, die intensiver in die Materie eindringen wollen, eine Orientierungshilfe sein.

Geschichte des geologischen und biologischen Denkens

Bei meiner Rekonstruktion der Geschichte der Geologie und Biologie im 18. und 19. Jahrhundert stütze ich mich weitgehend auf Sekundärliteratur, insbesondere auf *Archibald Geikie: The Founders of Geology*, London, McMillan, 1905; *Carroll und Mildred Fenton: Giants of Geology*, New York, Doubleday, 1952; *C. C. Gillispie: Genesis and Geology*, New York, Harper, 1959; *L. G. Wilson: Charles Lyell (eine Biographie)*, New Haven, Conn., Yale Univ. Pr., 1972; *Francis Darwin: The Life and Letters of Charles Darwin*, London, Murray, 1887; *Ernst Mayra: The Growth of Biological Thought*, Cambridge, Mass., Harvard Univ. Pr., 1982; *John und Katherine Imbrie: Ice Ages*, Short Hills, N. J., Enslow, 1979. Aber auch Primärquellen habe ich berücksichtigt, um die richtigen historischen Perspektiven zu gewinnen, insbesondere *John Playfair: Illustrations of the Huttonian Theory of Earth*, Edinburgh, Caddel and Davis, 1802; *Jean Lamarck: Philosophie zoologique*, 1809, 1914 in der englischen Übersetzung von *H. Elliot* unter dem Titel *The Zoological Philosophy*. Beide Titel sind bei McMillan in London erschienen; *Jean Lamarck: Hydrogeology*, Urbana, Ill., Univ. of Illinois Pr., 1975, übertragen von *A. Carozzi*; *Georges Cuvier: Recherches sur le ossements fossiles de quadrupèdes*, Paris, Deterville 1812; *Charles Lyell: Principles of Geology*, London, Murray, 1830–1833; *Charles Lyell: Geological Evidences of the Antiquity of Man*, 1863; deutsch 1864: *Das Alter des Menschengeschlechtes und der Ursprung der Arten durch Abänderung*; *Charles Darwin: On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, London, Murray, 1859; deutsch 1893: *Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl*. Ebenfalls von *Charles Darwin: The Descent of Man*, London, Murray, 1871.

Massenaussterben am Ende des Mesozoikums

Zwei besonders wichtige Arbeiten, die einem Meteoriteneinschlag die Schuld für das endkreidezeitliche Massensterben geben, wurden in *Science* veröffentlicht (einer Wochen-

schrift der Amerikanischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaft). Der Artikel *Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction* von Luis Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro und Helen Michel (*Science*, Band 208, 1980) lieferte die ersten soliden Beweise für einen Meteoriteneinschlag. Die Autoren des zweiten Aufsatzes, der hier zu nennen ist, sind 20 Wissenschaftler unseres Tiefsee-Bohrprojektes. Der Titel der betreffenden Arbeit lautet: *Environmental and evolutionary consequences of mass mortality at the end of Cretaceous* (*Science*, Band 216, 1982). Es geht in dieser Arbeit um das Modell des Massenaussterbens durch eine Umweltkatastrophe.

Mehrere neuere Publikationen von Symposien enthalten oder zitieren praktisch alle wichtigen Artikel über die Fragen, die sich bei einer Untersuchung des kreidezeitlich-tertiären Grenzbereichs erheben. Von Tove Birkelund, Richard Bromley und Kegel Christiansen wurde 1979 *Cretaceous-Tertiary Boundary Events* herausgegeben, veröffentlicht von der Universität Kopenhagen. Der Band mit den Verhandlungsprotokollen der zweiten K-Tec-Konferenz über *Cretaceous-Tertiary Extinction and Possible Terrestrial and Extraterrestrial Causes*, herausgegeben von Dale Russell und G. Rice, wurde 1982 als *Syllogus* Nr. 39 vom Naturwissenschaftlichen Nationalmuseum in Ottawa (Kanada) herausgebracht. Die Schriften einer Konferenz über *Large Body Impacts and Terrestrial Evolution*, die in Snowbird, Utah, stattfand, wurden als Sonderpublikationen 190 der Geologischen Gesellschaft der USA in Boulder, Colorado, gleichfalls 1982 veröffentlicht. Der Titel dieser von Leon Silver und Peter Schultz herausgegebenen Schrift lautet: *Geological Implications of Impacts of large Asteroids and Comets on the Earth*. Schließlich wurde eine Reihe von Schriften über *The Possible Influences of Sudden Events on Biological Radiation and Extinction* in dem 1984 erschienenen Bericht *Patterns of Change in Earth Revolution* (hrsg. von H. D. Holland und A. F. Tendall, Heidelberg, Springer, 1984) über die Konferenz von Berlin aufgenommen, die im selben Jahre stattgefunden hatte.

Man denkt vor allem an die Dinosaurier, wenn von dem Massensterben am Ende der Kreidezeit die Rede ist. Über diese Gruppe außergewöhnlicher Tiere liegt eine Reihe hervorragender Bücher vor, insbesondere: *Dinosaurs* von W. D. Matthew, New York, American Museum of Natural History, 1915; *The Dinosaurs* von W. E. Swinton, London, T. Murby, 1934; *Dinosaurs: Their Discovery and Their World* von Edwin Colbert, London, Hutchinson, 1962. Ich persönlich schätze besonders die relativ neue Darstellung von Adrian Desmond: *The Hot-Blooded Dinosaurs: A Revolution in Paleontology*, London, Blond and Briggs, 1975. Die geowissenschaftliche Revolution der sechziger Jahre ermöglichte auch die Datierung von Gesteinsformationen anhand ihres remanenten Magnetismus. Mehrere Sachbücher schildern die Geschichte dieser wissenschaftlichen Leistung. Hier möchte ich ganz besonders *Continents in Motion* von Walter Sullivan, New York, McGraw Hill, 1974 sowie H. Takeuchi, S. Uyeda und K. Kanamori: *Debate about the Earth*, ins Englische übersetzt von K. Kanamori, San Francisco, Freeman/Cooper, 1967, empfehlen. Deutschsprachige Leser seien schließlich auf mein Buch *Ein Schiff revolutioniert die Wissenschaft* hingewiesen, das 1982 im Hamburger Verlag Hoffmann und Campe erschienen ist.

Die Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopenanalyse wurde erstmals 1950 von Harold Urey angewandt, um ein Bild urzeitlicher Umweltbedingungen zu gewinnen, und entwickelte sich in raschem Tempo. Besonders diejenigen meiner Leser, denen von der Schule her noch gewisse Grundkenntnisse in Chemie geläufig sind, möchte ich auf Ureys Originalveröffentlichung hinweisen, die Urey zusammen mit seinen Schülern Heinz Löwenstam, Sam Epstein und C. R. McKinney verfaßte. Ihr Titel lautet: *Measurement of Paleotemperatures and*

temperatures of the Upper Cretaceous of England, Denmark, and Southeastern United States (in: *Bulletin of the Geological Society of America*, Band 62, 1951). Die sorgfältige Lektüre von Wally Broecker und T. H. Peng: *Tracers in the Sea*, New York, Eldigo Press, 1982 vermittelt einen allgemeinen Eindruck der Fortschritte, die im Laufe der letzten drei Jahrzehnte erzielt wurden.

3. Wissenschaftskritik und Darwinismus

In meiner Auseinandersetzung mit dem Darwinismus als Ideologie fuße ich auf Karl Popper: *Conjectures and Refutations*, London, Routledge and Kegan Paul, 1963, ferner auf Popper: *Unending Quest*, London, Fontana, 1974 und seinem Artikel *The rationality of scientific revolution*, in: R. Harre (Hrsg.): *Problems of Scientific Revolution*, Oxford Univ. Pr., 1970; dazu kommen T. S. Kuhn: *Structure of Scientific Revolutions*, Chicago Univ. Pr., 1970; deutsch: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt/Main, Suhrkamp, 1976, 2. Aufl.; Imre Lakatos: *Falsification and the methodology of research programmes*, in: Imre Lakatos und A. Musgrave (Hrsg.): *Criticism and Growth of Knowledge*, Cambridge Univ. Pr., 1970; ds.: *History of science and its radiant reconstructions*, in: *Boston Studies in the Philosophy of Science VIII* (hrsg. von R. C. Buck und P. S. Cohen, Dordrecht, Holland, Reidel, 1970); schließlich Paul Feyerabend: *Against Method*, London, New Left Books, 1975, deutsch: *Wider den Methodenzwang*, Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1975; ds.: *How to defend society against science*, in: I. Hacking (Hrsg.): *Scientific Revolution*, Oxford Univ. Pr. 1981.

Ein Standardwerk über das Verhältnis der paläontologischen Befunde zum Neodarwinismus ist G. G. Simpson: *Tempo and Mode in Evolution*, New York, Columbia Univ. Pr., o. J. Ferner möchte ich die Artikelsammlung in *Evolution Now: A Century after Darwin* empfehlen, die von John Maynard Smith für *Nature* herausgegeben wurde und 1982 in London bei McMillan erschien, desgleichen die Aufsätze in A. Hallam (Hrsg.): *Patterns of Evolution*, Amsterdam, Elsevier, 1977 sowie in W. B. Harland (Hrsg.): *The Fossil Record*, London, The Geological Society, 1967 und in dem hervorragenden Handbuch *Principles of Paleontology* von David Raup und Steven Stanley, San Francisco, Freeman, 1975. Sehr gut lesbar sind schließlich die Aufsätze von Stephen Gould in: *Ever since Darwin*, New York, Norton, 1979 sowie in *The Panda's Thumb*, New York, Norton, 1980, deutsch: *Der Daumen des Panda*, Basel, Birkhäuser, 1987; das dünne Bändchen von Brian Leith: *The Descent of Darwin*, London, Collins, 1982 gibt eine gute Darstellung des Neodarwinismus für eine breitere Leserschaft.

Zahlreich sind die Bücher über den Sozialdarwinismus; besonders informativ sind einige neuere Veröffentlichungen, so D. R. Oldroyd: *Darwinian Impacts*, Milton Keynes, The Open Univ. Pr., 1980; Greta Jones: *Social Darwinism and English Thought*, Sussex, The Harvester Press, 1980; Daniel Gasmann: *The Scientific Origins of National Socialism*, London, McDonald, 1971.

Glossar

Abstammung: Abfolge lebender Organismen, die voneinander abstammen, aber Veränderungen im Sinne der Evolution (→ *Darwinismus*) unterworfen sind.

Aktualismus: Naturphilosophische Schule, die von der beständigen Gleichheit aller Naturvorgänge auf Erden ausgeht. Begründet von James Hutton (1726–1797) und Charles Lyell (1787–1875), der nicht nur an die beständige Gleichheit der auf Erden wirksamen Kräfte glaubte, sondern außerdem lehrte, daß auch das Tempo, in dem Prozesse auf Erden ablaufen, das Ausmaß der geologischen Ereignisse und die Lebensbedingungen sich stets gleich bleiben.

Albium: Abschnitt der Kreidezeit vor etwa 110–100 Millionen Jahren.

Ammoniten: Fossile Tierart mit spiralförmig gewundenem Panzer. Die Ammoniten lebten in den Oberflächengewässern urzeitlicher Meere und starben am Ende der Kreidezeit aus.

Anomalie, Iridium: Konzentration des seltenen Elementes Iridium in einem Sediment, die deutlich über dem «Hintergrundwert» (Normalwert) liegt. Gilt im allgemeinen als Beweis für das Vorhandensein einer aus dem Weltraum stammenden Komponente in der betreffenden Ablagerung.

Anomalie, Isotopen: Abweichung von der normalen Zusammensetzung der Isotopen eines Elements.

Anomalie, magnetische (Meeresboden): Bezeichnung der unterschiedlichen magnetischen Intensität von Meeresbodengestein.

Apollo-Objekte: Asteroiden, die nahe der Erde im Weltraum schweben und uns auf eine Entfernung von weniger als einer → *astronomischen Einheit* nahekomen.

Aquilapolleniten-Flora: Gruppe fossiler Pflanzen in Sibirien und im nördlichen Nordamerika, die am Ende der Kreidezeit ausstarben.

Astronomische Einheit (AE): Astronomisches Längenmaß, um die Entfernung zwischen Himmelskörpern auszudrücken. Eine AE entspricht der mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne.

Auswurf: Trümmer und Staub, die nach dem Einschlag eines außerirdischen Objektes in die Atmosphäre und Stratosphäre geschleudert werden.

Basalt: Gestein vulkanischen Ursprungs.

Belemniten: Im Meer schwimmende fossile Organismen, die am Ende der Kreidezeit ausstarben.

Benthisch: Den Meeresboden bewohnend. Gr. *bénthos* («Meerestiefe»).

Beschleunigungs-Massenspektrometer: Gerät zur Messung sehr niedriger Isotopenzusammensetzung in einer Materialprobe.

Bohrkern: → *Kern*.

Bolid: Auf der Erde einschlagendes astronomisches Objekt. Gr. *bolís* («Geschoß»).

- Braarudosphaera*: Art des → *Nannoplanktons*, meist in Meerwasser von ungewöhnlichem Salzgehalt lebend.
- Brachiopoden*: Am Meeresboden festsitzende muschelähnliche Tiere in flachen, offenen Meeren. («*Armfüßer*») Viele Arten dieser Gattung wurden am Ende der Kreidezeit ausgerottet.
- Bryozoen*: Kleine, im Wasser heimische Lebewesen, die auf den Böden flacher Meere leben und unter dem Trivialnamen «Moostierchen» bekannt sind. Viele Arten ihrer Gattung *cheilostoma* (wörtlich: «Randmänder») gingen am Ende der Kreidezeit zugrunde.
- Chron*: Terminus der → *Magnetostratigraphie* für einen Zeitabschnitt, der durch eine bestimmte → *Magnetisierung* von Gesteinsformationen gekennzeichnet ist.
- Chrysophythen*: Gruppe einzelliger Pflanzen (sogenannter → *Protisten*), die an der Oberfläche offener Meere treiben. Zu ihnen gehören Kieselalgen (→ *Diatomeen*), → *Nannoplankton* und andere Organismen.
- Daniam*: Zeitspanne, erste Stufe des → Paläozäns (mit anderen Worten: der Beginn des → *Tertiärs*) vor 65–60 Millionen Jahren.
- Darwinismus*: Die von Charles Darwin (1809–1882) begründete Lehre, wonach alle Lebensformen auf einen gemeinsamen Ursprung zurückgehen (Deszendenztheorie) und sich durch «natürliche Zuchtwahl» spätere Tierarten aus früheren Lebensformen entwickeln (→ *Evolutionstheorie*).
- Datierung, Fossilien*: Die relative (vergleichende) Datierung geologischer Formationen anhand der in ihnen eingeschlossenen schichttypischen Fossilien. Das Verfahren wurde Ausgang des 18. Jahrhunderts von William Smith (1767–1839) eingeführt.
- Datierung, magnetostratigraphische*: Bestimmung des Alters von Gesteinsformationen anhand der jeweils schichtspezifischen → *Magnetisierung* (vgl. → *Chron*, → *Magnetismus*, *remanenter* und → *Magnetostratigraphie*).
- Datierung, radiometrische*: Bestimmung des Alters von Gesteinsformationen durch chemische Analyse des Verhältnisses der in ihnen enthaltenen radioaktiven Element-Isotope zu deren Zerfallsprodukten. Vorausgesetzt, man kennt die Zeit, die ein radioaktives Isotop zum Zerfall um die Hälfte der jeweils vorhandenen Substanz benötigt («Halbwertszeit»), läßt sich auf dieser Basis die Altersbestimmung des betreffenden Gesteins vornehmen.
- Deszendenztheorie*: → *Darwinismus*.
- Devon*: Geologische Formation (bzw. Periode) des → *Paläozoikums* vor etwa 400–350 Millionen Jahren.
- Diatomeen*: Einzellige Pflanzen in feuchtem Milieu oder in den Oberflächengewässern der Meere, die einen Panzer aus Kieselsäure absondern («Kieselalgen»).
- Diluvialisten*: Lat. *diluvium* («Überschwemmung», «große Flut»). Naturwissenschaftler des 19. Jahrhunderts, die der Ansicht waren, eine gewaltige Überschwemmung, namentlich die biblische Sintflut (*Genesis* [1. Mos.] 6,5–8,13) sei das herausragende und prägende Ereignis der urzeitlichen Erdgeschichte gewesen.
- Dynamische Positionierung*: Technik, um ein Bohrschiff bei Tiefseebohrungen über dem bisweilen Tausende von Metern tieferen Bohrloch in Position zu halten. Dies geschieht durch zusätzliche, schwenkbare Schiffsschrauben, die der Abdrift des Schiffes durch Wind und Strömungen entgegenwirken.

Einschlag: Der Sturz eines Meteoriten auf die Erde bzw. dessen Aufprall an Land oder im Meer.

Einschlagenenergie: Energie, die beim Einschlag eines Meteoriten produziert wird. Physikalisch gesehen, handelt es sich um ein Umsetzen der kinetischen Energie (Bewegungsenergie) des aufprallenden Himmelskörpers in Druckwellen, Hitze und dergleichen.

Einschlagkrater: Krater, den der Einschlag eines Meteoriten auf der Erdoberfläche hinterläßt. Weite und Tiefe eines solchen Kraters hängen vor allem von der Größe und dem Gewicht des aufprallenden → *Boliden* ab.

Eiszeit: Trivialbezeichnung für das → *Pleistozän*, jenes Erdzeitalter, in dem zuletzt wiederholt riesige Gletscher weite Teile Europas und Nordamerikas bedeckten. Im engeren Sinne Bezeichnung der einzelnen Vergletscherungsphasen dieses Zeitalters, die durch Perioden warmen Klimas voneinander getrennt waren. Im Alpenraum bezeichnet man diese Eiszeiten nach Donaunebenflüssen und unterscheidet so eine → *Günz*-, → *Mindel*-, → *Riß*- und → *Würm*-Eiszeit.

Eozän: Gr. *eos* («Morgenröte») und *záo* («ich lebe») oder aber *kainós* («neu», «frisch») – die «Morgendämmerung» der heutigen Lebensformen auf der Erde. Geologische Epoche des → *Tertiärs* vor etwa 58–37 Millionen Jahren.

Evolution, phyletische: Allmähliche Veränderungen einer Lebensform aus einer anderen innerhalb einer einzelnen Abstammungslinie (vgl. → *Abstammung* und → *Darwinismus*).

Evolutionstheorie: → *Darwinismus*. Darwin glaubte an eine allmählich, stets «im gleichen Schritt» vor sich gehende Fortentwicklung der Arten. Der Gedanke, daß nach Jahrmillionen relativer evolutionärer Stagnation eine unvorhergesehene und unvorhersehbare Katastrophe zum Aussterben zahlreicher Lebensformen führen könnte, wovon sich dann nach Überwindung der Katastrophenfolgen eine Art «evolutionärer Explosion» anschließt, wie es die inzwischen vorliegenden paläontologischen und geologischen Befunde zu wiederholten Malen zeigen, kam ihm nicht und hätte auch gar nicht in sein System gepaßt, das im täglichen Lebenskampf den Motor der Evolution sah.

Falsifizieren: Als falsch «entlarven».

Fischton: Der → *Grenzton* in Stevn's Klint.

Flözgebirge: Veralterter Terminus aus dem 18. Jahrhundert. Eingeführt von dem deutschen Mineralogen Abraham Gottlob Werner (1749/50–1817), um flachliegende Formationen in Gebirgen zu kennzeichnen. Heute nicht mehr üblich (vgl. → *Geognosie* und → *Neptunismus*).

Foraminiferen: Auch als «Kammerlinge» bezeichnete einzellige Organismen (→ *Protisten*) im offenen Meer.

Geognosie: Wörtlich: «Erderkenntnis». Terminus, der von Naturforschern des 18. Jahrhunderts verwendet wurde. Als Begründer der Geognosie gilt Abraham Gottlob Werner (vgl. → *Flözgebirge* und → *Neptunismus*).

Globigerina eugubina: Nach der Stadt (und Fundstätte) Gubbio (antiker Name: *Eugubium*) in Umbrien so benannte Gruppe sehr kleiner → *Foraminiferen*, die zu Beginn des → *Tertiärs* lebten. Möglicherweise handelt es sich bei ihnen um die Urahnen der heute lebenden Foraminiferen.

- Globorotalia*: Name einer Art von planktonischen → Foraminiferen, die am Anfang der Tertiärzeit erstmals erschienen.
- Globotruncana*: Name einer Art von planktonischen → Foraminiferen, die am Ende der Kreidezeit ausgerottet wurden.
- Glomar Challenger*: Name eines vom Tiefsee-Bohrprojekt gecharterten Bohrschiffes zur Erforschung des Meeresbodens.
- Grauwacke*: Name, den man im 19. Jahrhundert einigen Sedimentformationen in Deutschland gab (es handelt sich um Verwitterungsprodukte des → Basalts), die heute als paläozoisch betrachtet werden (vgl. → Paläozoikum).
- Grenze (stratigraphisch)*: Kontakt zwischen zwei verschiedenen Gesteinsformationen.
- Grenzsediment*: Sediment an einer → Grenze.
- Grenzton (zwischen Kreidezeit und Tertiär)*: Tonschicht zwischen den letzten kreidezeitlichen und den ersten tertiären Sedimenten (vgl. → Fischton).
- Günz*: Nebenfluß der Donau im bayerischen Schwaben. Nach den dort gefundenen Sedimenten erhielt die Günz-Eiszeit ihren Namen. Es war die erste → Eiszeit des → Pleistozäns im zentralen Europa vor ungefähr 590 000–550 000 Jahren.
- Hartgrund*: Zementartig verhärtetes Sediment auf dem Meeresboden.
- Hiatus*: Wörtlich: «klaffende Öffnung», «gähnender Schlund»: Lücke im geologischen Befund zwischen zwei Sedimentschichten.
- Holozän*: Gr: *hólos* («ganz») und *záo* («ich lebe») bzw. *kainós* («neu», «frisch»). Die erdzeitliche Gegenwart – das «ganz neue» Erdzeitalter mit allen heute noch lebenden organischen Entwicklungsformen. Es begann vor rund 10 000 Jahren.
- Inoceramus*: Gattung von Meeresmuscheln, die am Ende der Kreidezeit ausstarb.
- Internationale Phase der Ozeanbohrung*: Englisch: *International Phase of Ocean Drilling* (abgekürzt: IPOD). Phase der Tiefsee-Erforschung, die finanziell von mehreren Nationen getragen wurde.
- Ionensonde*: Instrument zur chemischen Analyse sehr winziger Mengen eines Elementes oder seiner → Isotope im Felsgestein.
- Isotope*: Elementvarianten von unterschiedlicher Neutronenzahl bei gleicher Kernladung, bzw. von unterschiedlicher Massenzahl bei gleichem chemischen Zeichen. Trotz meist gleichen chemischen Verhaltens können Isotope eines Elements ganz unterschiedliche physikalische Eigenschaften aufweisen, beispielsweise sind manche Isotope eines und desselben Elementes instabil, d. h. sie zerfallen radioaktiv, und diese Radioaktivität ermöglicht die radiometrische → Datierung des betreffenden Element-Vorkommens. Aber auch die nicht radioaktiv zerfallenen «stabilen» Isotope sind in ihrer Zusammensetzung wichtige Indikatoren, die eine Fülle von Aufschlüssen über erdgeschichtliche Prozesse geben, so etwa über Veränderungen der Meereschemie, über Temperaturveränderungen und anderes mehr.
- Jura*: Erdgeschichtliche Periode des → Mesozoikums vor rund 200–135 Millionen Jahren.
- Kambrische Explosion*: Allem Anschein nach plötzlich und explosionsartig verlaufender «Evolutionsschub» (vgl. → Evolutionstheorie) zu Beginn des → Kambriums, als die ersten Schalentiere auf der Bildfläche erschienen.
- Kambrium*: Geologische Unterperiode des → Paläozäns vor rund 580–500 Millionen Jahren. Es wurde offensichtlich durch einen mächtigen «Evolutionsschub» (die sog. → Kambrische Explosion) eingeleitet.

Känozoikum: Das Zeitalter der heutigen Lebewesen, von griechisch *kainós* («neu», «frisch») und *zōon* («Lebewesen»). Das Känozoikum begann vor 65 Millionen Jahren und dauert heute noch an. Es umfaßt das → *Tertiär* und das → *Quartär* mit den Epochen → *Paläozän*, → *Eozän*, → *Oligozän*, → *Miozän*, → *Pliozän*, → *Pleistozän* (die sogenannte → *Eiszeit*) und → *Holozän* (die erdgeschichtliche Gegenwart).

Kataklysmos: Verheerende Flut mit vermuteter Massenausrottung von Lebewesen an Land. Der Ausdruck kommt vom griechischen *katá* (wörtlich: «zum Grunde hin», «nach unten») und *klýzein* («überfluten», «über die Ufer treten»). Kataklysmentheorien gab es in der antiken Überlieferung häufig, und sie beschränken sich keineswegs auf die Überlieferung der Sintflut in der Bibel, auf die die → *Diluvialisten* schworen.

Katastrophismus: Naturphilosophische Lehre, wonach die Erdgeschichte durch außergewöhnliche Ereignisse geprägt wurde, die zur Massenausrottung fossiler Organismen führten. Der Ausdruck geht auf das griechische *katá* (wörtlich: «zum Grunde hin», «nach unten») und *strophé* («Wendung») zurück (vgl. → *Diluvialisten* und → *Kataklysmos*). Charles Lyell setzte dem Katastrophismus seinen → *Aktualismus* entgegen, der nur den Fehler hatte, daß Lyell und seine ihm ergebenen Anhänger nun urzeitliche Katastrophen und «erdgeschichtliche Ausnahmezustände» ganz und gar leugneten. Die heutige Geowissenschaft ist zu einem gemäßigten Katastrophismus zurückgekehrt, wobei sie sich allerdings nicht mehr an irgendwelchen Überlieferungen, sondern an den Befunden der jüngsten erdwissenschaftlichen Feldforschung sowie an Laboratoriumsexperimenten orientiert (soweit Laboruntersuchungen überhaupt etwas über erdgeschichtliche Prozesse auszusagen vermögen).

Kephalopoden: Gr. «Kopffüßer». Gruppe schwimmender Schalentiere. Zu ihr gehören die noch lebenden zehnfüßigen Tintenfische sowie die ausgestorbenen → *Ammoniten*, die im → *Mesozoikum* eine der verbreitetsten Meerestierarten darstellten.

Kern, Bohrkern: Bodenprobe, die gewonnen wird, indem man ein rohr- oder zylinderförmiges Entnahmegesäß in den Meeresboden treibt.

Kern, Hydraulikzylinder: Kern (Bohrkern, Bodenprobe), den man gewinnt, indem man einen Bohrzylinder mit hydraulischer Kraft in den Meeresboden treibt.

Kern, Schwerkraft: Derartige Kernproben werden gewonnen, indem man das Entnahmegesäß (den Entnahmebehälter) mit Schwung auf den Meeresboden fallen läßt, so daß ihn seine eigene Schwerkraft in den Boden treibt.

Kern, Zylinder: Man gewinnt diese Art von Sediment-Bohrkernen, indem man eine zylinderförmige Vorrichtung zur Probenentnahme in den Meeresboden treibt.

Kladistisch: Gr. *kládos* («junger Baumsproß», «frischer Zweig»). In der Abstammungslehre (vgl. → *Darwinismus* und → *Evolutionstheorie*) Bezeichnung des Modells, wonach neue Arten durch Verzweigung des allen gemeinsamen Stammbaumes entstehen.

Konvergenz, adaptive: Evolutionärer Trend zu enger morphologischer Ähnlichkeit zwischen nichtverwandten Gruppen von Organismen, die den gleichen Lebensraum bewohnen.

Kreationismus: Lehre einer religiösen Sekte, wonach die Bibel buchstabengetreu die Geschichte der Erde und des Lebens schildert.

Kreidezeit: Dritte und letzte geologische Periode des → *Mesozoikums* vor 135–65 Millionen Jahren.

Lithosphäre: Gr. *lithos* («Stein») und *sphaîra* («Kugel»). Die dünne (weniger als 100 km dicke)

äußere Schicht des Erdballs, deren chemische Zusammensetzung sich deutlich von der der Meteoriten unterscheidet.

LOCO: Abkürzung für engl. *long core* («langer [Bohr-]Kern»). Versuch, ein Projekt in Gang zu bringen, das mittels langer Bohrkern die Geschichte der Ozeane zu erforschen sucht.

Maastricht: Stadt in Holland, bei der man die ersten Sedimente der nach ihr benannten endkreidezeitlichen → *Maastrichtphase* fand und beschrieb.

Maastrichtphase, Maastrichtium: Die letzte «Stufe» bzw. die letzten fünf Millionen Jahre der Kreidezeit vor rund 70–65 Millionen Jahren. Sie endete mit der Ausrottung sämtlicher → *Ammoniten*.

Magnetisierung, normale: Die Orientierung magnetischer Mineralien, die sich kristallisierten bzw. abgelagert wurden, als das Erdmagnetfeld die gleiche Orientierung hatte wie heute. Vgl. → *Magnetismus, remanenter*.

Magnetisierung, reverse: Die reverse («umgekehrte») Orientierung von Gesteinsformationen (bzw. der in ihnen eingelagerten magnetischen Mineralien), die sich bildeten, als das Erdmagnetfeld revers (umgepolt, bzw. umgekehrt gepolt) war – mit anderen Worten: als sich der magnetische «Nordpol» nicht wirklich im geographischen Norden des Erdballs, sondern irgendwo in der Antarktis befand. Da dies nur zu bestimmten Zeiten der Fall war, die man als → *Chron* bezeichnet, ist es möglich, die Entstehungszeit der betreffenden Formationen zu bestimmen (vgl. → *Datierung, magnetostratigraphische* und → *Magnetismus, remanenter*).

Magnetismus, remanenter: Gewisse Arten magnetischer Materialien weisen die Fähigkeit auf, die Feldlinien des Erdmagnetfeldes zu bewahren, die sie unter bestimmten chemischen Bedingungen oder im Zustand der Erhitzung (so z. B. bei vulkanischen Ergußgesteinen) «aufgeprägt» erhielten. Im letztgenannten Fall spricht man von thermoremanentem Magnetismus. Ändern sich diese Bedingungen (z. B. wenn das Ergußgestein erkaltet), bleibt die ursprüngliche magnetische Orientierung dennoch weiterbestehen, wenn sich das Erdmagnetfeld insgesamt umorientiert oder gar «umkippt» (so daß der magnetische Nordpol geographisch im Süden liegt). Da sich das Erdmagnetfeld zu bestimmten Zeiten änderte (vgl. → *Chron*), sind damit Ansatzpunkte für eine Bestimmung der Entstehungszeit der betroffenen Formationen gegeben (vgl. → *Datierung, magnetostratigraphische*, → *Magnetisierung, normale*, → *Magnetisierung, reverse* und → *Magnetostratigraphie*).

Magnetostratigraphie: Junge Methode der geologischen Forschung, um das Alter einer Gesteinsformation anhand ihrer magnetischen Orientierung zu bestimmen (vgl. → *Datierung, magnetostratigraphische*, → *Magnetisierung, normale*, → *Magnetisierung, reverse*, → *Magnetismus, remanenter* und → *Stratigraphie*).

Massenspektrometer: Instrument zur Bestimmung der Isotopenzusammensetzung (vgl. → *Isotope*) einer Materialprobe.

Meeresboden-Ausbreitung: → *Seafloor Spreading*.

Mesozoikum: Das geologische «Erdmittelalter» bzw. das «Mittelalter» organischer Wesen vor 250–65 Millionen Jahren. Es umfaßte die Formationen → *Trias*, → *Jura* und → *Kreidezeit*.

Meteor: Extraterrestrisches Objekt, das durch die Atmosphäre stürzt, dabei durch die Reibungshitze aufglüht und Lichtphänomene («Sternschnuppen») hervorruft.

Meteorit: Wegen seiner Größe in der Atmosphäre nicht völlig verglühtes extraterrestrisches Objekt, das auf die Erdoberfläche aufgeprallt ist. Es kann sich dabei ebenso um einen Asteroiden wie um den Rest eines Kometen handeln.

Mikrofossilien: Winzige Fossilien, insbesondere → *Foraminiferen*.

Mikrotekrite: Zu Boden gefallener staubartiger → *Auswurf*, der durch die → *Einschlagenergie* beim Aufprall eines → *Meteoriten* in glühenden Zustand versetzt und zu → *Sphaerulae* zusammengeschmolzen wurde.

Milankovitsch-Zyklen: Zyklische Veränderungen der Erdumlaufbahn um die Sonne, benannt nach ihrem Entdecker, dem jugoslawischen Astronomen Milutin Milankovitch (1879–1958).

Mindel: Nebenfluß der Donau. Nach ihr ist die Mindel-Eiszeit benannt, die zweite größere Vergletscherung des Alpenraumes während des → *Pleistozäns* vor etwa 476 000–435 000 Jahren (vgl. → *Eiszeit*).

Miozän: Epoche des → *Känozoikums*, und zwar des → *Tertiärs*, vor etwa 24–5 Millionen Jahren.

Monismus: Entwicklungsgeschichtlicher Materialismus, entwickelt von dem deutschen Naturforscher Ernst Haeckel (1854–1919), der auf der Grundlage des → *Darwinismus* entschieden rassistische Standpunkte vertrat und so die pseudowissenschaftliche Begründung für den Nationalsozialismus lieferte (vgl. → *Sozialdarwinismus*).

Nannofossilien: Wörtlich: «Zwergfossilien». Fossiles → *Nannoplankton*.

Nannoplankton: Wörtlich: «Zwergplankton». Winzige, einzellige Pflanzen (vgl. → *Protisten*), die in den Oberflächengewässern der Ozeane treiben.

Nature: Englischsprachige, wissenschaftliche Wochenschrift, hrsg. von der McMillan Verlagsgesellschaft.

Neptunismus: Eine Theorie des 18. Jahrhunderts. Ihr zufolge waren sämtliche Felsgesteine auf Erden ozeanischen Ursprungs. Heute als unzutreffend erwiesen. Hauptvertreter des Neptunismus war der deutsche Mineraloge Abraham Gottlob Werner (1749/50–1817). Vgl. → *Flözgebirge* und → *Geognosie*.

Neutronenaktivierungsmethode: Moderne Technik zur Bestimmung sehr geringer Mengen von Spurenelementen in Gesteinen.

NO_x: Stickoxyde. Verbindung von Stickstoff mit beliebig vielen (x) Sauerstoffatomen. Derartige Verbindungen, welche die Atmosphäre verseuchen, entstehen nur bei extremen Temperaturen, z. B. im Lichtbogen (Blitz) oder durch die Hitze, die der → *Einschlag* eines → *Meteoriten* erzeugt (vgl. → *Einschlagenergie*). Neuerdings erzeugen wir sie durch die Dauerhitze bei industriellen Verbrennungsvorgängen oder in Automotoren.

Oligozän: Erdgeschichtliche Epoche des → *Känozoikums*, und zwar des → *Tertiärs*, vor etwa 37–24 Millionen Jahren.

Oortsche Wolke: Nach dem niederländischen Astronomen Jan Hendrik Oort (geb. 1900) benannte Region am äußersten Rande des Sonnensystems. Aus ihr stammen die Kometen.

Ordovizium: Periode des → *Paläozoikums* vor etwa 500–455 Millionen Jahren.

Pachydermen: Gr. «Dickhäuter». Gruppe dickhäutiger Tiere wie Elefanten und Nashörner.

Paläothermometrie: Gr. «Uhrzeit-Temperaturmessung». Eine Methode, anhand des «chemi-

schen Kodes» der Schalen urzeitlicher Organismen die Temperaturen früherer Perioden der Erdgeschichte zu bestimmen.

Paläozän: Die erste Epoche des → *Känozoikums* (und zwar innerhalb dessen wieder des → *Tertiärs*) vor 65–58 Millionen Jahren.

Paläozoikum: Ära urzeitlicher Lebewesen vor etwa 580–250 Millionen Jahren.

PDB: → *Belemniten* der sogenannten → *Pee-Dee-Formation*. Sie dienen als Standardmaß für die Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopenzusammensetzung in Gesteinsproben (vgl. → *Isotope*).

Pee Dee: Fluß in Südkarolina (USA).

Pelagische Sedimente: Gr. *pélagos* («offenes Meer»). Im Ozean abgelagerte Sedimente, Sedimente ozeanischen Ursprungs.

pH: Abkürzung für lateinisch *potentia Hydrogenii* («Wasserstoffpotenz»). Ausdruck der Wasserstoffionenaktivität und Maß des Säuregehaltes einer Lösung.

Phytoplankton: Gr. «treibende Pflanzen». Mit Hilfe der Photosynthese Kohlenstoff assimilierende, einzellige Pflanzen (→ *Protisten*), die als → *Plankton* im Meer treiben.

Plankton: Gr. «treibend» bzw. «umhergetrieben». Sammelbezeichnung im Meer schwimmender oder treibender Meeresorganismen.

Platinmetalle: Gruppe von Spurenelementen, die mit dem Platin verwandt sind. Vergleichsweise häufig in → *Meteoriten*, umfassen sie Platin, Iridium, Osmium, Gold usw. Sie sind auch unter der Bezeichnung → *Siderophile* bekannt.

Pleistozän: Das Erdzeitalter, das der erdgeschichtlichen Gegenwart, dem → *Holozän* (vgl. → *Känozoikum*) voranging. Es begann vor ca. 1,8 Millionen Jahren und endete vor zehntausend Jahren. Das Pleistozän war das Zeitalter der großen Vergletscherungen Europas und Nordamerikas und wird daher häufig auch summarisch als → *Eiszeit* bezeichnet, obwohl zwischen den einzelnen Kaltzeiten auch ausgedehnte Phasen erheblich wärmeren Klimas lagen.

Pliozän: Das Erdzeitalter vor dem → *Pleistozän* vor 5–1,8 Millionen Jahren.

Polarität: Die Polarität des Erdmagnetismus.

Polaritätsepoche: Geologischer Zeitraum, innerhalb dessen das Erdmagnetfeld stabil blieb (vgl. → *Chron*).

Polaritätsepoche, normale: Epoche (→ *Chron*) «normaler» oder «positiver» Magnetisierung, in der das Erdmagnetfeld seinem jetzigen Zustand entsprach (vgl. → *Magnetisierung, normale*).

Polaritätsepoche, reverse: Epoche (→ *Chron*) mit umgekehrtem Erdmagnetismus, in der sich der magnetische «Nordpol» nicht wirklich im geographischen Norden, sondern irgendwo in der Antarktis befand (vgl. → *Magnetisierung, reverse*).

ppb: Englische Abkürzung für «Anteile pro Milliarde» (*parts per billion*), 10^{-9} .

ppt: Englische Abkürzung für «Anteile pro Billion» (*parts per trillion*), 10^{-12} .

Primär (primitiv): Veraltete Bezeichnung für die ältesten Felsformationen auf der Erde. Heute nicht mehr üblich.

Protisten: Einzellige Lebewesen wie → *Foraminiferen* → *Nannoplankton* und → *Phytoplankton*, die von einigen Wissenschaftlern als eigenständige Lebensform angesehen werden, die weder mit dem Tier- noch mit dem Pflanzenreich zu tun hat.

Pseudoaussterben: Veränderung einer Art zu einer anderen, so daß der Eindruck entsteht, die ältere Art, die sich in Wahrheit nur weiterentwickelt hat, sei ausgestorben.

- Punctuated equilibrium*: Etwa «Gleichgewicht mit Unterbrechungen». Terminus für eine ungleichmäßige Evolutionsrate. Dieses Modell widerspricht dem reinen → *Darwinismus*, der von einer gleichmäßigen, stetigen Entwicklungsrate ausgeht.
- Quartär*: Das jüngste Erdzeitalter, die geologische Jetztzeit. Es begann vor ungefähr 1,8 Millionen Jahren und dauert noch an. Es ist Teil des → *Känozoikums* und umfaßt seinerseits das → *Pleistozän* (die → *Eiszeit*) und das → *Holozän* (die erdgeschichtliche Gegenwart).
- Radiolarien*: «Strahlentierchen». Einzellige Lebewesen (→ *Protisten*), die als → *Plankton* in den Oberflächengewässern der Meere schwimmen.
- Riß*: Nebenfluß der Donau. Nach ihm ist die vorletzte alpine → *Eiszeit* (vor 230 000–187 000 Jahren) benannt (vgl. → *Pleistozän*).
- Roche-Limit*: Der kleinste Abstand, den ein Komet von einem Stern haben kann, ohne durch dessen Anziehungskraft in seine Bestandteile zerlegt zu werden.
- Roter Ton*: Rötlich oder braun gefärbter Ton in ozeanischen Tiefseebereichen.
- Rudisten*: Gruppe meeresbodenbewohnender Mollusken, die am Ende der → *Kreidezeit* vollständig ausgestorben sind.
- Sanidin*: Ein Feldspatmineral (Kaliumaluminiumsilikat, $\text{KA}_2\text{Si}_3\text{O}_8$).
- Science*: Von der Amerikanischen Gesellschaft zur Förderung der Naturwissenschaft (*American Association for the Advancement of Science*) herausgegebene, englischsprachige Wochenschrift.
- Seafloor Spreading*: («Meeresboden-Ausbreitung»). Eine Theorie, nach der die Ozeane immer größer werden, während die Kontinente auseinanderdriften.
- Sekundär*: Veralterte Bezeichnung für die zweitälteste Gruppe von Felsformationen auf der Erde. Nicht mehr im Gebrauch.
- Siderophile (Elemente)*: Gr. *siderós* («eisern») und *philos* («Freund»). «Eisenliebende» Elemente. Eine Gruppe von Edelmetallen mit starker Affinität zum Eisen. Andere Bezeichnung der → *Platinmetalle*.
- Silur*: Erdgeschichtliche Periode des → *Paläozoikums* vor etwa 435–400 Millionen Jahren.
- SMOW*: Abkürzung für *Standard Mean Ocean Water* («Mittlerer Standard des Ozean-Wassers»), das Standardmaß für den Vergleich der → *Isotope* des Sauerstoffs.
- Sozialdarwinismus*: Auf die Gesellschaft angewandter → *Darwinismus*, wonach sich im Lebenskampf der «Überlebenstüchtigeren» durchsetzt. Dieser Sozialdarwinismus, der das «Recht des Stärkeren» als angebliches «Naturgesetz» propagierte, lieferte die pseudowissenschaftliche Begründung für den Rassismus eines Ernst Haeckel (1834–1919 [→ *Monismus*]) und in der Folge für die Diktaturen und den Rassismus des 20. Jahrhunderts (insbesondere für den Nationalsozialismus). Tatsächlich spielte auch für Darwin der «Kampf ums Überleben» eine zentrale Rolle bei der «natürlichen Zuchtwahl» und tatsächlich glaubte Darwin selbst an das Überleben «begünstigter Rassen». Doch derartige Behauptungen sind längst als wissenschaftlich unhaltbar entlarvt. Darwin erweist sich hierin ganz als Kind seiner Zeit und der kapitalistischen Gesellschaft damaliger Prägung, deren ganze gesellschaftspolitische Ideologie um Zentralbegriffe wie «Konkurrenzkampf» und «Recht des Stärkeren» kreiste.
- Sphaerulæ*: Gr./lat. «Kügelchen». Kleine, runde Objekte. Bezeichnung für Auswürflinge oder für kugelhähnliche Gebilde extraterrestrischen Staubs in Sedimenten (vgl. → *Mikrotektite*).

- Strangelove-Kontinent*: Bezeichnung für einen durch eine Katastrophe völlig verwüsteten Kontinent, die dem Film «Dr. Strangelove, or How I Learned to Stop Worrying and Love the Bomb» (von Stanley Kubrick) entnommen ist.
- Strangelove-Ozean*: Das Denkmodell eines Ozeans, der fast gänzlich ohne Leben ist. (vgl. → *Strangelove-Kontinent*).
- Stratigraphie*: Gr. «Schichtbeschreibung», «Schichtenkunde». Wissenschaft von den Gesteinsschichten, ihrem Alter, ihrem Ursprung usw. Da die einzelnen Schichten auch eine schichtspezifische Magnetisierung aufweisen, entwickelte sich als neuer Forschungszweig die → *Magnetostratigraphie*.
- Streifen, magnetische*: Lineare Abschnitte des Meeresbodens mit abwechselnd normaler und umgekehrter (reverser) Magnetisierung (vgl. → *Magnetisierung, normale*, und → *Magnetisierung, reverse*).
- Stufe*: Unterteilung geologischer Epochen.
- Tertiär*: Erdzeitalter nach der → *Kreidezeit* vor etwa 65–1,8 Millionen Jahren. Umfaßt das → *Paläozän*, → *Eozän*, → *Oligozän*, → *Miozän* sowie das → *Pliozän* und ist selbst Teil des → *Känozoikums*.
- Transitional Gesteine*: «Übergangsgesteine». Veralteter Terminus für die Gesteine über dem → *Primär* und unter dem → *Sekundär*.
- Trias*: Die erste (älteste) der drei Perioden des → *Mesozoikums* vor etwa 250–200 Millionen Jahren.
- Tunguska-Ereignis*: Wahrscheinlicher Meteoriteneinschlag am Ufer des Flußes Tunguska in Sibirien (30. Juni 1908).
- Universelle Formationen*: Heute als falsch erwiesene Vorstellung des 18. Jahrhunderts, wonach jede Felsformation auf der ganzen Erde anzutreffen ist.
- UVB-Strahlung*: Für lebende Organismen schädliche ultraviolette Strahlung.
- Velikovskismus*: Unwissenschaftliche Methode der Altertums- und Urzeitdeutung, die davon ausgeht, daß die Bibel und andere Autoren des Altertums buchstabengetreu die Wahrheit berichteten.
- Vitaleffekt*: Die durch Lebensvorgänge der Organismen ausgelöste Abweichung vom Isotopen-Gleichgewicht (→ *Isotope*).
- Warven*: Auch «Bändertone». Jährliche Sedimentablagerungen.
- Würm*: Nebenfluß der Donau und – nach ihm – Bezeichnung der letzten → *Eiszeit* des Alpenraumes vor 70 000–10 000 Jahren (vgl. → *Pleistozän*).
- Zooplankton*: Schwimmende einzellige Tierchen in den Oberflächengewässern der Ozeane. Gegensatz: das pflanzliche → *Phytoplankton*.

Geologische Zeittafel

Ära	Periode	Epoche	Epochenbeginn vor Millionen Jahren
Känozoikum	Quartär	Holozän	0,01
		Pleistozän	1,7
	Tertiär	Pliozän	5,0
		Miozän	23
		Oligozän	37
		Eozän	59
		Paläozän	65
Mesozoikum	Kreide		135
	Jura		195
	Trias		220
Paläozoikum	Perm		
	Karbon		
	Devon		
	Silur		
	Ordovizium		
	Kambrium		600
Präkambrium	Proterozoikum		
	Archaikum		

Index

A

- Abkühlung 105
- Abkühlungstendenz 120
- Abstammung 18, 22
- Abstammungslehre 20, 23
- Abstammungslinien 87
- Abstufung 207, 209
- Adirondacks 215
- Affen 22, 24
- Agassiz, Louis 41
- Ahrens, Tom 165, 166, 167, 168, 169, 171, 217, 219
- Aktualismus 7, 36, 37, 39, 41, 42, 46, 49, 52, 87, 184, 230
- Aktualisten 40, 88, 92, 94
- Akzelerator-Massenspektrometer 157
- Albium 91, 92
- Algen 68, 207, 241, 242, 247
- Algenfresser 241, 242
- Algenteppich 241
- Algenwachstum 207
- Alligatoren 102
- Aluminium 153
- Alvarez, Luis 136, 150, 151, 152, 153, 154, 159, 160, 163, 164, 165, 167, 170, 172, 173, 216, 217
- Alvarez, Walter 81, 136, 138, 139, 143, 146, 150, 151, 152, 153, 154, 159, 163, 164, 165, 167, 172, 173, 211, 244
- Alvarez-Gruppe 144, 153, 164
- Alvarez-Team 143, 152, 153, 172, 173, 175
- Ammoniten 38, 52, 53, 55, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 91, 92, 93, 124, 137, 142, 172, 173, 179, 226, 227, 240
- Amphibien 247
- Analysetechnik 158
- Anders, Edward 9
- Anderson, Tom 165, 195, 208
- Angiospermen 175
- Anpassung 24, 25, 26, 29, 54, 57, 221, 229
- Anpassungsmechanismen 8
- Antimon 211, 217
- Apollo-Objekte 132, 133, 140, 160
- Aquilapolleniten-Flora 155, 156, 175, 176, 177
- Aquilapolleniten-Provinz 219
- Archaeopteryx 16, 56
- Argon 70
- Armfüßer 93, 94, 95, 110, 111, 173
- Arrhenius, Gustaf 116, 117
- Arsen 211, 217
- Artenanpassung 27
- Artenentstehung 27, 33
- Artenentwicklung 26
- Artenkreuzung 85
- Artenneubildung 26, 231, 237, 238, 241, 243
- Artensterben 27, 28, 29, 216, 217, 241, 244
- Artenvielfalt 57, 94, 237, 238
- Artenwechsel 230
- Asaro, Frank 152, 153, 154, 155, 159, 242
- Asteroid 129, 143, 159, 160, 161, 163, 167, 168, 169, 171
- Aussterben 12, 13, 28, 29, 40, 53, 54, 63, 73, 83, 84, 85, 86, 87, 91, 92, 94, 95, 98, 103, 111, 142, 164, 173, 175, 176, 177, 195, 196, 197, 200, 225, 226, 227, 228, 230, 231, 232, 237, 239, 241, 247
- Aussterbenshorizont 155, 193
- Aussterberate 94, 95, 212
- Australopithecus afarensis 23
- Auswürflinge 168, 169, 172
- Auswurfsmaterial 167, 168, 169, 171
- B**
- Bakker, Robert T. 55, 57, 99, 102
- Bakterien 24
- Bambusbären 100
- Belemniten 52, 53, 57, 62, 110, 111, 142, 172, 173, 179, 226
- Belemniten-Durchschnittstemperatur 111
- Berger, Wolf 136, 137, 138, 139, 182
- Berggren, Bill 63, 64, 65, 66
- Beschleunigungs-Massenspektrometer 158
- Bethell, Tom 232, 233
- Bibel 21, 36, 38, 40, 86, 141, 172, 197, 246
- Big-Creek-Formation 196, 197
- Biomasse 222
- Birkelund, Tove 90, 91, 92, 93, 138, 139
- Blausäure 127
- Blausäureverbindungen 217
- Blausäurevergiftung 217
- Blitzschläge 218
- Blumenkinder 246
- Bodenströmungen 191, 201, 202
- Bohor, Bruce 169
- Bohrexpeditionen 185, 186, 187, 192
- Bohrkern 80, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 156, 185, 187, 189, 190, 191, 194
- Bohrkernprobe 158
- Bohrkopf 185, 189
- Bohrlöcher 80, 113, 188, 190
- Bohrschiff 183, 186
- Bohrstelle 186, 188, 190, 191
- Bohrungen 184, 191
- Bohrverfahren 188
- Bohrzylinder 185, 187
- Boliden 8, 9
- Braarudospaera 136, 137, 212
- Brachiopoden 93, 95, 110, 111, 173, 227
- Brachiosaurus 15, 56
- Bramlette, Bill 98
- Brennecke, J.C. 195, 208
- Bretz, J. Harlen 50
- Brieftaube 232
- Brocchi, Giovanni 42, 44
- Broecker, Walter 202, 205, 206, 208, 225
- Brontosaurus 15, 56
- Brooker, Wallace 201
- Brownlee, D. E. 161
- Bruhnes, Bernhard 74, 75, 80
- Brutpflege 25

Bruttemperatur 226
 Bryozoen 90, 91, 93, 95
 Buckland, William 40, 41
 Burnet, Thomas 38
 Busch, Wilhelm 246

C

Caldrill I 119
 Carman, Max 186
 Carnegie, Andrew 18, 26
 CCD (vgl. Kalzitkompensations-
 tiefe) 181, 182, 183, 184, 187,
 203, 210
 Cenoman 111
 Chain, Ernst 245
 Challenger 150
 Chamberlain, T. C. 60
 Chappuis, Esther 141
 Cheilostoma Bryozoa 90, 91
 Chromosomen 226
 Chron 80, 81, 82, 83, 84, 151,
 152, 156, 157, 190, 195
 Clemens, Bill 197
 Clube, Vic 140, 161, 163, 244
 Coccolithen 97, 98, 174
 Coelacanthus 86
 Colbert, Edwin 102
 CORE 119
 Crick 24, 140
 Croft, Steven 165, 172
 Cuvier, Georges 13, 14, 36, 37,
 38, 40, 41, 42, 45, 53, 67, 86

D

D'Aubuisson de Voisin, Jean
 François 39
 D'Orbigny, Alcide Dessalines
 63, 64
 Dänemark 65, 67, 90, 91, 93,
 153, 154, 158, 164, 210
 Danium 46, 61, 62, 63, 64, 65,
 90, 91, 93, 98, 111
 Daphne Major 234
 Darwin, Charles 7, 8, 9, 11, 12,
 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 22,
 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 33,
 36, 52, 53, 54, 55, 58, 62, 64,
 68, 84, 97, 163, 229, 230, 232,
 233, 234, 235, 236, 237, 239,
 247, 248
 Darwinfinken 26, 234
 Darwinismus 7, 19, 228, 233,
 246
 Datierung 75, 80, 82, 107, 108,
 185
 Datierungsmethode 78, 244

De Laubenfels 96, 105, 123,
 124, 138, 141, 143, 223
 Deinodon 15
 Deshayes, Gerard 44, 45, 53
 Desmaret, Nicholas 39
 Desor, Eduard 61, 62, 63
 Desoxyribonukleinsäure 23,
 141
 Deszendenztheorie 22, 23, 24
 Deuterium 108
 Diatomeen 106, 136, 181
 Dilcher, David 178
 Dinosaurier 13, 14, 15, 16, 24,
 27, 28, 31, 37, 43, 45, 46, 52,
 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 73,
 83, 84, 87, 89, 92, 95, 96, 97,
 98, 99, 100, 101, 102, 105, 107,
 110, 123, 141, 142, 143, 145,
 154, 155, 157, 163, 164, 175,
 178, 179, 196, 197, 216, 223,
 225, 226, 227, 230, 238, 239,
 240, 243, 246, 247
 Dinosauriereier 103
 Dinosauriersterben 100, 102,
 110, 111
 Diversität 88, 89, 91, 106
 DNS 23, 24
 Dobzhansky 233
 Donnerkeile 110
 DSDP 119, 120, 122, 170, 182,
 184
 Dunkelheit 171, 172, 173, 174,
 175, 179, 212, 227
 Dunkelheitsperiode 178

E

Echinoiden 173
 Ediacara-Berge 242, 243
 Ehrenberg, Christian Gottfried
 97
 Eidechsen 124
 Einschlag 132, 141, 165, 169,
 200, 216, 217, 218, 219, 223,
 245
 Einschlagdruck 217
 Einschlagenergie 135
 Einschlagereignisse 218
 Einschlaggebiet 223
 Einschlagkrater 129, 131, 135,
 143, 164, 166, 168
 Einschlagmechanik 166
 Einschlagstelle 132, 134, 218,
 245
 Einschlagtemperatur 217
 Einschlagtrümmer 244
 Einstein, Albert 141, 230

Eiszeit 42, 45, 51, 99, 100, 113,
 114, 115, 117, 118, 120, 122,
 183, 205, 206, 225, 233
 Eiszeitalter 121
 Elasmosaurus 16
 Eldridge, Niles 231
 Elefant 14, 36
 Elementkonzentration 158
 Emiliani, Cesare 112, 113, 117,
 118, 119, 143, 144, 223, 224
 Engels, Friedrich 19
 Eozän 45, 46, 51, 53, 100
 Epstein, Sam 110, 111
 Erben, Heinrich 197, 223
 Erdkern 76
 Erdmagnetfeld 73, 75, 76, 77,
 78, 80
 Erdmagnetismus 77
 Ericson, Dave 116, 117
 Ernährungsstörungen 99
 Erwärmung 224
 Eugenik 19
 Eugubinen 196
 Evolution 7, 8, 11, 20, 23, 25,
 27, 28, 29, 30, 47, 52, 53, 54,
 58, 60, 65, 66, 67, 87, 165, 176,
 221, 229, 230, 232, 233, 235,
 236, 237, 238, 239, 241, 243,
 244, 245, 247, 248
 Evolutionsbegriff 52
 Evolutionsmodell 8
 Evolutionstheorie 12, 36, 87,
 236
 Ewing, Maurice 118, 119, 151
 Existenzkampf 9, 26, 163, 178,
 245
 Explosionsenergie 130

F

Fallgeschwindigkeit 166
 Falsifikation 240
 Farnsporen 175, 176
 Fassett, James 83
 Feinschichtung 210
 Feldlinien 77
 Feldlinienverlauf 74
 Feldmann, Paul 217
 Feldstärke 78
 Felsentaube 232
 Ferri, Enrico 18
 Feuerball 166, 172, 218, 223
 Finsternis 164, 171, 173, 174,
 177, 178, 197, 211, 216, 220,
 222
 Fischbestand 215
 Fischton 61, 62, 64, 66, 92, 93,
 94, 153, 154, 193, 196, 210

Fischton-Grenze 62
 Fixsternexplosion 143
 Flächenbrände 176
 Flußpferde 36
 Foraminiferen 63, 64, 65, 66,
 72, 73, 81, 84, 89, 93, 95, 98,
 106, 111, 113, 115, 120, 121,
 122, 142, 151, 172, 174, 179,
 181, 182, 189, 193, 196, 203,
 206, 208, 209, 210, 222, 238,
 248
 Forchhammer, Johann Georg
 61
 Fortpflanzungsfähigkeit 103,
 221, 222, 223, 225
 Fortpflanzungsrate 222
 Fortpflanzungsstörung 227
 Frostkatastrophe 41
 Fruchtbarkeit 226
 Fruchtbarkeitszyklen 207
 Fruchtfliegen 235
 Fütterer, Dieter 187, 188, 189

G

Galapagosinseln 25, 26, 234
 Galton, Francis 19
 Ganapathy, R. 150, 154
 Gardner, Steve 136
 Gault, Don 165
 Geiss, Hans 118
 Gene 235
 Genotyp 232
 Geo-Secs 199, 200, 201, 203,
 204, 206
 Geochemie 146, 236
 Geophysik 236
 Gerstl, Siegfried 171
 Gesteinsstaub 164
 Gibbon 24
 Gift 97, 167
 Ginkgobäume 92
 Ginsburg, Bob 112
 Ginsburg, Robert 47
 Glaukonit 211
 Gliederfüßler 242, 247
 Globigerina eugubina 66, 93,
 248
 Globorotalia menardii 115,
 116, 117
 Globorotalia sacculifer 174
 Globotruncana 63, 65, 196
 Glomar Challenger 119, 120,
 122, 184, 186, 187, 192, 195
 Goebbels, Joseph 11
 Goethe, J.W. 20
 Goeze 239
 Gold 147, 150, 154, 155

Goldschmidt, V. M. 146, 147,
 148, 149, 150
 Gomorrha 135, 141, 223
 Gondwanaland 49
 Gorilla 24, 25
 Gould's Gürtel 140
 Gould, Stephen 230, 231, 232,
 233, 239, 240, 242
 Gradualismus 231
 Greenough, George Bellas 35
 Greifensee 207, 208
 Grenz-«Ereignis» 203
 Grenzbereich 67, 71, 72, 82,
 138, 139, 143, 150, 153, 155,
 159, 164, 183, 187, 196, 209
 Grenze 60, 84, 93, 120, 122,
 137, 138, 150, 187, 188, 192,
 193, 194, 208, 209, 236
 Grenzformation 242
 Grenzhorizont 183, 243
 Grenzlinie 91, 120, 177
 Grenzort 243
 Grenzsichten 194
 Grenzsediment 170, 176, 203,
 210
 Grenzsequenz 90, 155
 Grenzton 66, 72, 73, 81, 82, 95,
 151, 152, 153, 154, 156, 157,
 158, 160, 167, 168, 169, 176,
 183, 192, 193, 196, 203, 208,
 210, 211, 217
 Grenzton-Proben 164
 Grenzverlauf 59
 Grenzzeit 113
 Griezone 154, 160, 189
 Grieve, Robert 131, 132, 134,
 135, 167
 Griggs, David 105
 Grundströmungen 116, 117
 Gubbio 59, 65, 66, 67, 68, 69,
 71, 72, 73, 81, 82, 84, 93, 138,
 151, 152, 153, 160, 168, 169,
 183, 193, 203, 210, 211, 239
 Gürteltier 229

H

Haddonfield 15
 Hadrosaurus 15, 16, 56, 87
 Haeckel, Ernst 7, 19, 20
 Hakansson 90
 Halleysche Komet 126, 127,
 133, 134, 135, 142, 159, 168
 Halliday, Jan 161
 Harknady, Chris 9, 161
 Harvey, H. W. 98
 Hawaii 235
 Hay, Bill 183

Hayden, Ferdinand 15
 Hays, Jim 185, 186
 He, Qixiang 195
 Heirtzler, Jim 79
 Herodot 141
 Hertogen, J. 143
 Hess, Harry 77
 Heteroheliden 65
 Hickey, Leo 176, 177, 178
 Hintergrundausterben 94
 Hintergrundrate 95
 Hitler, Adolf 20
 Hitze 101, 102, 105, 123, 128,
 143, 147, 226
 Hitzeperiode 123
 Hitzestreß 103
 Hitzewelle 102, 103, 124
 Holden, John 139
 Holmes, Arthur 71
 Holozän 45, 121
 Hominiden 23, 25
 Hughes, David 132, 141
 Hühner 103
 Hunger 98, 99, 100
 Hungertheorie 172
 Hutton, James 34, 36, 37, 41
 Huxley, Julian 233
 Huxley, Thomas 97

I

Ichthyosaurier 52
 Ichthyosaurus 87
 Iguanodon 14, 15, 16
 Iguan 14
 Insekten 34, 85, 92, 239, 247
 Insektenfresser 247
 Insektensterben 178
 Ionensonde 158
 IPOD 184
 Iridium 147, 149, 150, 152, 153,
 154, 155, 156, 157, 159, 160,
 164, 167, 170, 195
 Iridiumanomalie 150, 153, 154,
 155, 156, 157, 164, 170, 171,
 175, 195, 196, 203, 209, 224,
 242, 243
 Iridiumgehalt 168
 Iridiumkonzentration 152,
 153, 156, 160, 167, 169, 170
 Iridiumspitze 155, 157, 242
 Isotope 69, 70, 71, 107, 108,
 111, 117, 118, 148, 149, 158,
 194, 195, 196, 199, 203, 204,
 206
 Isotopenabstufung 206, 207
 Isotopenanalyse 71, 120, 121,
 122, 196, 200, 242

Isotopendaten 138, 204
 Isotopenfraktionierung 208
 Isotopenkomposition 108, 109, 121
 Isotopenlabor 121
 Isotopenmessungen 208
 Isotopentechnik 117, 121
 Isotopenverhältnis 159, 160, 206, 209
 Isotopenzusammensetzung 109, 121, 158, 159, 195, 204, 206, 207, 208, 209
 Isotopkern 149

J

Jaguar 229
 Jangtse Kiang 242, 243
 Jarzen, David 178
 Jass 30
 Jean Charrot 187
 Johansen, Marianne 93, 94
 JOIDES 79, 119, 137, 184
 Jones, Eric 165, 170

K

Kalium 70, 215
 Kaliumargonmethode 157
 Kälte 99, 101, 106, 226
 Kälteeinbruch 100
 Kälteperiode 113, 117
 Kaltzeiten 117, 118
 Kalzitkompensationstiefe (vgl. CCD) 181, 183, 184, 203, 210
 Kalzium 215
 Kambrium 64, 92, 241, 242, 243
 Kamel 27
 Kammerlinge 95
 Känozoikum 45, 46, 53, 57, 59, 60, 61, 65, 66, 75, 80, 82, 83, 88, 89, 95, 111, 113, 120, 122, 139, 151, 187, 190, 232, 241
 Kant, Immanuel 20
 Kapbecken 187, 188, 191, 193, 194, 208, 211
 Kataklysmentheorie 37
 Katastrophe 8, 29, 31, 51, 52, 60, 86, 94, 95, 96, 124, 127, 136, 138, 140, 141, 142, 160, 164, 167, 173, 176, 177, 179, 195, 197, 199, 200, 207, 209, 211, 212, 213, 216, 217, 222, 224, 227, 230, 237, 238, 240, 241, 243, 244
 Katastrophentheorie 38, 39, 42
 Katastrophismus 37, 46, 52
 Katastrophisten 40

Katmai 171
 Kauffman, Earle 100, 101
 Kelvin 68, 105
 Kennett, Jim 122
 Kent, Denis 82
 Kephelopoden 53, 57
 Keratops 16, 55
 Kernbohrer 115, 189
 Kernbohrungen 185
 Kerne 118, 119
 Kernproben 185, 189
 Kieselalgen 106, 181
 kinetische Energie 130, 166
 Kleine Wasserbären 239, 240
 Klima 27, 41, 42, 51, 99, 102, 105, 106, 107, 111, 113, 114, 117, 119, 120, 221, 224, 229, 231, 234
 Klimabedingungen 106
 Klimaentwicklung 116, 121, 122
 Klimageschichte 120
 Klimaschwankungen 100, 113, 116, 120, 123
 Klimavarianten 118
 Klimaveränderungen 106, 118
 Klimaverbesserung 101
 Klimaverschlechterung 101
 Klimawechsel 221, 224, 231
 Klimazonen 106
 Kobalt 154
 Kodis, John 165, 170
 Koësit 131, 169
 Koevolution 26
 Kohlendioxyd 103, 222, 224, 225
 Kohlendioxydgehalt 225
 Kohlenmonoxyd 217
 Kohlensäure 222
 Kohlenstoffanomalie 196
 Kohlenstoffisotopenanalyse 195, 204, 207
 Kohlenstoffisotopenanomalie 208, 209, 242, 243
 Kohlenstoffisotopenanteile 207
 Kohlenstoffisotopendaten 204, 206, 208
 Kolbenbohrer 185, 186, 187, 188, 189
 Kollisionsenergie 134
 Komet 125, 126, 127, 130, 133, 134, 135, 136, 139, 140, 141, 145, 150, 159, 160, 161, 163, 167, 168, 169, 171, 218
 Komet Encke 126, 130, 133
 Komet Iheya-Seki 126
 Komet Kohutek 127, 140

Kometeneinschlag 134, 141, 142, 233, 244
 Kometenfragment 129, 130
 Kometenkern 131
 Kometenkollision 134, 142, 217
 Kometenkopf 218
 Kompensationslinie 182, 183, 187
 Konkurrenzkampf 11, 13, 27, 28, 30, 230
 Kontinentalverschiebung 49
 Korallen 106, 227
 Krähenbühl, Urs 154, 195, 242
 Krakatoa 171
 Krater 134, 136, 141, 161, 166, 167, 168, 169, 244
 Kraterbildungsrate 135
 Kratergröße 135
 Kreationismus 21, 46
 Kreationisten 21, 229, 240
 Kreide 53, 58, 60, 62, 65, 66, 67, 68, 71, 72, 81, 82, 84, 91, 93, 156, 159, 164, 183, 188, 193, 197, 208, 209
 Kreide-Tertiär-Grenzfrage 63
 Kreidehorizont 191
 Kreidezeit 9, 46, 59, 61, 62, 64, 65, 66, 68, 71, 72, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 95, 96, 97, 98, 100, 101, 105, 107, 110, 111, 119, 120, 122, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 150, 151, 154, 155, 157, 159, 160, 161, 163, 165, 168, 170, 173, 175, 176, 177, 178, 179, 183, 186, 187, 188, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 200, 203, 208, 209, 210, 227, 232, 240, 243
 Krokodile 99, 123
 Kropftaube 232
 Kropnick, Peter 200, 201
 Küchenschaben 55, 92
 Kulik, Leonid 128
 Kullenberg, Borge 116
 Kullenberg-Kernbohrer 116
 Kyte, Frank 164, 168

L

LaBrecque, John 186, 191
 Lama 229
 Lamarck, Chevalier de 20, 33, 34, 35, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 85, 86, 87
 Laminierung 191
 Laves, Fritz 146, 147, 150
 Lebensbedingungen 51, 233, 240

Lebenserwartung 55, 92
 Lebensformen 247
 Lebenskampf 18, 52, 54, 237, 239
 Lebenstüchtige 241
 Lebenstüchtigkeit 229, 240
 Lebenstüchtigste 245
 Leguane 99
 Leidy, Joseph 15
 Lerbekmo, J. F. 83
 Lewis, John 218, 220
 Lindsay, E. H. 83
 Lingula 55, 92
 Linné, Carl von 85, 94
 Lipps, Jerry 174, 175
 Lithosphäre 146, 147, 158
 Loch Bakie 41
 Loch Ness 16, 86
 LOCO 118, 119
 Löwenstam, Heinz 110, 111
 Lowrie, Bill 81, 151, 152
 Lucy 23
 Luterbacher, Hans Peter 65, 66, 67, 71, 72, 151
 Lyell, Charles 7, 23, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 58, 60, 64, 84, 86, 182, 183, 184, 222, 230

M

Maastricht 13, 14, 27, 46, 52, 53, 61, 90, 91, 240
 Maastrichtien 61, 93
 Maastrichtphase 92, 94, 110, 111
 Maastrichtschichten 64
 Maastrichtstufe 46, 60, 62, 63
 Maastrichtzeit 95, 98, 101, 111
 Magnet 76
 Magnetfeld 78
 Magnetfeld-Periode 83
 Magnetfeld-Polarität 81
 Magnetfeld-Umkehr 74
 Magnetfeldepoche 81
 Magnetfeldkarten 76
 Magnetismus 74, 75, 76, 77, 78, 80
 Magnetometer 76, 78, 189
 Magnetostratigraphie 73, 81, 82, 83, 151, 153, 156, 185
 Magnetostratigraph 152
 Magnetpol-Umkehrung 79
 Magnetpole 75
 Magnetstreifen 79
 Malthus, Thomas Robert 16, 17, 18, 28, 237
 Mammut 233

Mammutbäume 92
 Mandschus 34, 35
 Manson-Krater 9
 Mantell, Gideon 14
 Mao Tse-Tung 20
 Maoismus 245
 Marshall, Alfred 19
 Marx, Karl 7, 18, 19
 Marxismus 245
 Massenaussterben 8, 94, 101, 159, 175, 179, 183, 186, 194, 216, 223, 226, 227, 230, 237, 238, 239, 241, 244
 Massenspektrograph 71, 107, 109, 118
 Massenspektrometer 118, 158
 Massenspektrometeranalyse 203
 Massensterben 28, 31, 82, 91, 94, 95, 98, 100, 101, 103, 136, 140, 142, 143, 151, 157, 163, 165, 172, 173, 175, 176, 177, 178, 193, 197, 212, 221, 222, 225, 228, 244
 Mastodon 14, 37, 43, 45
 Mastodonknochen 36
 Matthews, Drum 78, 79, 141
 Matuyama, Montanari 74, 75, 80
 Mayr 233
 McCrea, J. M. 109
 McKenzie, Judy 186, 195, 199, 200, 205, 207, 208
 McLaren, Digby 237, 239
 McLean, Dewey 102, 103, 105, 143, 163, 225, 245
 Medusen 242
 Meeres-Geochemie 205
 Meeresboden-Ausbreitung 77, 81, 151
 Meeresboden-Ausdehnung 76, 77, 78, 79, 119, 141, 185
 Meereseinbrüche 101
 Meeresplankton 220, 222, 225
 Meeresschildkröte 55
 Meeresverunreinigungen 142
 Melosh, Bill 165
 Mendel, Gregor 24, 235
 Menschenaffen 23, 24
 Mesozoikum 46, 52, 53, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 82, 83, 89, 91, 92, 93, 94, 96, 99, 100, 105, 113, 120, 139, 143, 151, 153, 241, 243
 Meteor-Expedition 115, 116
 Meteore 125, 129, 130, 159

Meteorite 9, 10, 124, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 135, 147, 148, 150, 154, 158, 161, 163, 164, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 178, 179, 216, 217, 218, 223, 224, 240, 243, 244, 245
 Meteoriteneinschlag 129, 130, 131, 132, 135, 144, 150, 166, 170, 176, 199, 217, 219, 223, 227, 242, 243, 244, 245
 Meteoritenfragmente 130, 131
 Meteoritenkrater 131, 135, 169
 Michel, Helen 152, 153, 159
 Mikro-Ökologie 26
 Mikrofossilien 62, 63
 Mikroorganismen 34, 85, 89
 Mikrotektite 129, 130, 146, 167, 168, 169, 170
 Mineralsalze 215
 Miozän 45, 46, 100, 184, 185, 187
 Mittelmeer 48, 51, 120, 122, 184, 201
 Mohole 112, 118
 Molekularbiologie 23
 Mollusken 34, 35, 52, 57, 60, 63, 86, 94, 137, 173
 Mongolismus 20
 Monismus 20
 Mont Vendôme 37, 52
 Moostierchen 90, 95
 Moränen 42
 Mosasaurus 14, 238, 240, 241
 Muller, Richard 244
 Muscheln 13, 36, 38, 42, 44, 45, 53, 86, 93, 109, 194, 241, 242
 Muschelreihen 35
 Mutationen 220, 235

N

Nahrungsangebot 212
 Nahrungskette 97, 98, 142, 164, 172, 173, 227
 Nannofossilien 62, 98, 137, 190, 191, 192, 193, 194, 196
 Nannoplankton 66, 89, 97, 106, 113, 117, 136, 137, 139, 142, 174, 179, 181, 182, 189, 190, 193, 196, 203, 210, 211, 222, 223
 Nannoplanktonarten 137, 191, 195, 222
 Napier, Bill 140, 161, 163, 244
 Napoleon 13, 20
 Nashörner 36
 Natrium 153

Naturkatastrophe 8, 9, 37, 199, 200
 Natürliche Zuchtwahl 7, 8, 12, 16, 18, 19, 20, 22, 24, 25, 27, 31, 229, 230, 232, 233, 234, 240, 245
 Nautilus 38
 Neandertal 20
 Neandertaler 22, 23
 Nemesis 244, 245
 Neodarwinismus 233
 Neptunisten 37, 38
 Nessie 86
 Neutronen 148, 149, 152, 160, 161, 243
 Neutronenaktivierungsanalyse 148, 149, 150, 152, 156, 157, 160, 195
 Neutronenbombe 238
 Neutronendetektive 160, 163
 Nickel 154
 Niggli, Paul 109
 Niklas, Karl 247
 Nische 8, 24, 26, 27, 28, 29, 229, 239, 240, 241, 247
 Nischentheorie 238, 241
 Nistplätze 56
 Nitrate 212, 222
 Nitrogenium 216
 NO 218
 NO_x 216, 218, 219
 Nummuliten 64
 Nye Klov 90, 91, 93

O

O'Keefe 165, 166, 167, 169, 219
 Oberhänsli, Heidi 174, 242, 243
 Ökosysteme 221
 Oligozän 45, 46, 100
 Ontogenese 19
 Oortsche Wolke 132, 140
 Oozes 113
 Opdyke, Neil 151
 Opossum 92, 229
 Orang Utan 24
 Ordovizium 88, 241
 Orphal, Don 165
 Orth, Carl 156, 157, 175
 Osmium 147, 149, 150, 154, 158, 217
 Overton, William 21
 Owen, Richard 14, 15
 Oxygenium 216
 Ozeanographie 236
 Ozon 218, 219, 220
 Ozonabbau 220
 Ozonschicht 219, 220, 227

P

Paarungsverhalten 226
 Paläobotanik 121
 Paläontologen 237
 Paläontologie 236
 Paläoökologen 107
 Paläoökologie 106
 Paläotemperaturtabellen 137
 Paläothermometer 107, 109, 110, 111, 112, 113, 204
 Paläozän 45, 46, 122, 187, 189, 191, 197
 Paläozoikum 46, 55, 89, 136, 241, 243
 Palladium 154
 Parasiten 238
 Pariser Becken 36, 37, 40, 41, 42, 43, 45, 58, 68, 86
 Pee-Dee-Belemniten 109
 Penck, Albrecht 113, 114, 115, 117, 118
 Perch Nielsen von Salis, Anna Katharina 139, 143, 193, 196
 Percival 190, 191, 192, 193, 194, 195
 Perm 241, 243
 Peterson, Nikolai 195
 Pfauentaube 232
 Pfeffermotte 25
 pH-Wert 214, 215, 220, 222
 Phosphate 212
 Photosynthese 97, 103, 164, 171, 172, 174, 177, 201, 202, 210, 212
 Phylogenese 19
 Phytoplankton 97, 98, 103, 137, 172, 173, 174, 177, 183, 193, 202, 205, 206, 208
 Plankton 52, 58, 65, 73, 82, 84, 89, 90, 95, 99, 100, 103, 113, 116, 117, 124, 142, 143, 173, 181, 182, 185, 194, 195, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 217, 221, 222, 223, 225, 226, 248
 Planktonblüten 202, 212
 Platin 147, 149, 154, 155, 157, 158
 Platinmetalle 147, 150, 152, 153
 Plattentektonik 50, 236
 Pleistozän 45, 75, 121
 Pliozän 45, 46, 75, 100
 Plummer, Helen Jeanne 63
 Plutonium 160
 Polarität 75, 157, 189
 Polaritätsepoche 78, 80, 83
 Polaritätsumkehrungen 76

Pollen 154, 155, 247
 Pollenanalyse 218
 Pollenassemblagen 175
 Pollenbefunde 176
 Pollendiagramm 175, 176
 Polysprung 74, 75, 77, 78
 Polumkehrung 74, 82, 185
 Poore, Dick 193
 Popper, Karl 21, 22, 240, 246
 Populationsdichte 93
 Populationsdruck 230
 Populationsvielfalt 93
 Populationswachstum 237
 Populationsziffer 226
 Potentia hydrogenii 214
 Präkambrium 242
 Premoli-Silva, Isabella 65, 66, 67, 71, 72, 81, 151, 187
 Prevost, Louis Constant 40
 Protisten 106
 Prout, William 69
 Pseudoaussterben 87, 88, 93
 Pteranodon 16
 Pterosaur 16, 52, 55, 87, 99
 Pyrit 211
 Pythonischlangen 99

Q

Quallen 242
 Quartär 74
 Quastenflosser 86

R

Radiolarien 106, 181, 189
 Radiometrie 69
 Radiometrische Datierung 71, 72, 107, 108, 157, 244
 Raff, Art 76
 Rassen 245
 Rassismus 19, 20, 245
 Ratonbecken 155, 156, 157, 158, 169, 175, 176
 Raubtier 230, 238
 Rauppilz 223
 Rauchsäule 166
 Raumforschung 131
 Raup, David 88, 89, 200, 244
 Regenwasser 213, 214, 215, 221
 Regression 67, 101
 Remanenter Magnetismus 80, 106, 151, 156, 185, 189
 Reptilien 14, 16, 24, 89, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 102, 105, 172, 226, 247
 Rhenium 154, 158
 Richards, T. W. 69, 70

Richardson, Benjamin 44
 Riesenechsen 31, 46, 52, 87,
 123, 178
 Riesenmeteorit 96, 170, 178,
 223
 Riesenpanda 54, 100
 Riesensalamander 38
 Rio Brazos 47
 Roche, E. 126
 Roche-Grenze 126
 Rockefeller, John Davidson 18,
 26, 87
 Rom 22
 Ruboglobigeriniden 65, 196
 Rudisten 52, 57, 62, 179, 226,
 227
 Runcorn, Keith 73, 74, 75
 Ruß 176, 210
 Russell, Dale 89, 102, 105, 155,
 163
 Ruthenium 150, 154, 217

S

Saito, Tsuni 120, 121
 Salpetersäure 215, 216, 218,
 220, 222
 Salz 215
 Salzgehalt 136, 137
 San-Juan-Becken 83
 Sauerstoff 101, 216, 218, 219,
 227
 Sauerstoffanomalie 109, 110,
 137, 196
 Sauerstoffisotopenanomalie
 137
 Sauerstoffisotopendaten 224
 Sauerstoffverlust 101
 Säuger 229, 231
 Säugetiere 27, 36, 37, 43, 54,
 55, 96, 97, 100, 102, 124, 196,
 197, 225, 227, 230, 231, 239,
 240, 243, 246, 247
 Säuregehalt 214, 215, 222, 226
 Saurer Regen 215, 216, 218,
 220, 222
 Saurier 13, 16, 86, 96, 99, 100,
 102, 230
 Schalentiere 240, 242
 Scheuchzer, Johann Jacob 38
 Schichtungsstruktur 191
 Schildkröten 96, 99, 123
 Schimpansen 24
 Schindewolf, Otto 138, 159
 Schlangen 99, 124
 Schmidt, Helmut 20
 Schöpfungsgeschichte 21, 47, 234
 Schultz, Peter 165

Schwefel 215
 Schwerkraftkerne 115
 Seafloor Spreading 76, 119
 Sedimentationsgeschwindig-
 keit 71
 Sedimentationsrate 82
 Seehunde 106
 Seeigel 61, 173
 Seelilien 61
 Seesterne 61
 Seewasserchemie 142
 Selenium 217
 Sepkowski, John 244
 Serucki, Stan 185
 Shackleton, Nick 121, 122, 123,
 124, 137, 143, 144, 150, 151,
 195, 208, 224
 Shakespeare, William 233
 Shaw, George Bernard 20
 Shoemaker, Gene 131, 135,
 156, 157, 179, 245
 Shu, Sun 243
 Siamang 24
 Siderophile 147
 Silur 88, 241
 Silver, Lee 165
 Simpson 233
 Sintflut 13, 34, 38, 40, 47, 86,
 172
 Sintfluttheorie 37
 Smit, Jan 143, 144, 163, 168,
 170, 193, 196, 197
 Smith, John Maynard 230, 236
 Smith, William 43, 44, 45, 236
 SMOW 108, 109
 Snow, C. P. 138
 Snowbird-Konferenz 8, 9, 90,
 158, 165, 166
 Soddy, Frederick 69
 Sodom 135, 141, 223
 Somerset-Kanal 43, 45, 46
 Sommer, Theo 20
 Sorby, Henry 97
 Sozialdarwinismus 20
 Spektralanalyse 161
 Sphaerulæ 168, 169, 170
 Spiecker, Ed 47, 60, 61, 62
 Spinnen 247
 Sporen 176
 Spurenelementanalyse 149,
 150, 151
 Spurenelementchemie 168
 Spurenelemente 153
 Stachelhäuter 62, 63
 Stanley, Steve 241, 242
 Stegosaurier 16, 54
 Stenzel, Heinrich 59, 60, 61,
 62, 63

Sternschnuppen 129, 132
 Stevns's Klint 61, 92, 138, 164,
 169, 176, 210
 Stickoxyd-Verbindungen 216
 Stickoxyde 216, 218, 219, 220
 Stickstoff 216
 Strahlentierchen 106, 181, 189
 Strangelove-Effekt 206, 207
 Strangelove-Kontinente 209,
 210
 Strangelove-Ozean 207, 208,
 209, 212, 222
 Stratigraphie 44, 73
 Strontium 194
 Superga-Höhen 42, 45
 Supernova 138, 143, 159, 160
 Supernova-Explosion 144, 159
 Surlyk, Finn 93
 Süßwasser-Injektion 136, 137
 Swain, Tony 96, 97

T

T-Zellen 220
 Tao 246, 247, 248
 Tao Te Chin 246
 Taoismus 246
 Tapir 36, 229
 Tappan, Helen 98
 Tauxe, Lisa 195
 Tektite 128, 129, 135, 146, 167
 Tektitenfeld 170
 Temperaturabfall 110
 Temperaturanalyse 113
 Temperaturanstieg 105, 111,
 122, 123, 138, 143, 225
 Temperaturbestimmungsmetho-
 den 117
 Temperaturschwankungen
 100, 122
 Temperaturskala 109
 Temperaturstörung 223
 Temperaturstürze 100, 122,
 223, 240
 Tertiär 9, 46, 59, 60, 61, 62, 64,
 65, 67, 71, 72, 81, 82, 84, 89,
 90, 93, 120, 122, 136, 137, 138,
 139, 143, 150, 154, 155, 156,
 159, 164, 168, 177, 178, 183,
 187, 188, 192, 193, 194, 195,
 196, 197, 208, 209, 212, 220,
 225, 243
 Teufelsfinger 110
 Therapsiden 24
 Thierstein, Hans 136, 137, 138,
 139, 163, 194
 Thomsen 90

Thomson, Sir William (vgl. Kelvin) 105
 Thoracosphaera 212
 Thymusdrüse 220
 Tiefsee-Bohrexpedition 161
 Tiefsee-Bohrprojekt 182, 184, 185, 186
 Tiefseebohrungen 184
 Tiefseekernbohrungen 187
 Tiefseesedimentbohrkerne 118
 Tiefseesedimentproben 118
 Tierverebreitungs-«Provinzen» 106
 Todesrate 93, 95
 Toon, Brian 165, 170, 171, 219, 223
 Trachodon 15
 Transformationen 42
 Transgressionen 67, 101
 Transmutabilität 36
 Transmutationisten 23
 Traverse, Alfred 96
 Treibhaus-Effekt 8, 224, 227
 Treibhaustheorie 107
 Trias 241, 243
 Trikeratops 27
 Trilobiten 242
 Tritium 108
 Tschudy, Robert 175, 176
 Tucker, Peter 195
 Tümmeler 232
 Tunguska 127, 128, 129, 130, 135, 168
 Tunguska-Ereignis 129, 130, 135, 218, 219
 Tunguska-Gebiet 129, 130, 146, 150, 168
 Tunguska-Objekt 130
 Turekian, Karl 158
 Tyrannosaurus 27, 56, 97
 Tyrannosaurus rex 15, 54, 157

U

Übergangszone 193
 Überhitzung 143

Überlebensfähigkeit 12
 Überlebensmuster 95
 Überlebenstauglichkeit 28, 29, 233, 234
 Überlebenstüchtigkeit 241
 Ultraviolettstrahlung 219, 220
 Umpolungen 80
 Unfruchtbarkeit 240
 Unterkühlung 99
 Unterwasserlawinen 48
 Urey, Harold 107, 108, 109, 110, 112, 113, 117, 120, 137, 141, 142, 204
 Uyeda, Seiya 74

V

Valen, Leigh van 99, 196
 Vacquier, Vic 76
 Variationsspektrum 235
 Velikovsky, Immanuel 141, 142
 Vereisungsperioden 115
 Vereisungsphasen 114, 115, 116
 Vererbungsmuster 235
 Verfinsterung 172, 178, 179
 Vergiftung 100, 142
 Vergiftungsmodell 217
 Vergletscherung 117
 Vergletscherungsphasen 114, 117
 Vergreisungshypothese 55
 Viktoria, Königin von England 15
 Vine, Fred 76, 77, 78, 79, 141
 Vogt, Peter 139
 Vollmer, John 145, 148
 Vulkanisten 37, 39

W

Wachstumshemmer 17
 Wachstumsminderung 237
 Wachstumsringe 110
 Wal 238, 240, 241
 Waldbrände 128, 176, 210, 223
 Wallace, Alfred Russell 17, 26

Walrosse 106
 Wärmespeicherung 102
 Wärmestrahlen 224
 Wärmetod 111
 Warmphasen 117
 Warmzeiten 117
 Warven 68
 Wasserdampf 166
 Wasserstoffionenkonzentration 214
 Wasson, John 164, 168
 Watson 24, 140
 Wegener, Alfred 49, 77
 Weichtiere 91, 111
 Weissert, Helmut 186
 Weissmann, Paul 134
 Werner, Abraham Gottlob 38, 39
 Wetherill, George 132, 133, 134, 160
 Whipple, Fred 125, 126, 130, 133, 140, 141
 Wollin, Gösta 116, 117
 Woodward, John 38
 Worsley, Thomas 183, 187, 203
 Wright, Ramil 186, 209
 Wu, C. C. 242
 Würmer 34, 85, 194, 242
 Wüsteneidechsen 102

Y

Yangzchou 34

Z

Zardecki, Andrew 171
 Zerfallsmuster 152
 Zooplankton 137, 173, 174, 193, 196, 205, 215
 Zürichsee 69
 Zwischeneiszeit 114, 116
 Zyanide 127, 138, 139, 142, 217

Vor 65 Millionen Jahren, am Ende der Kreidezeit, starben die Dinosaurier aus, und mit ihnen verschwanden unzählige der im erdgeschichtlichen Mittelalter lebenden Arten. Dies ist durch Fossilienfunde bewiesen, doch was war die Ursache dieses Massensterbens, was war passiert? Kenneth Hsü, weltweit renommierter Geologe, geht dieser Frage nach. In wahrhaft interdisziplinärer Verknüpfung verschiedenster naturwissenschaftlicher Ansätze fügt er die Resultate von Geologen und Paläontologen, von Geophysikern und Geochemikern, von Meeresbiologen und Ozeanographen Steinchen für Steinchen zu einem großen Puzzle zusammen und erhält im Ergebnis einen überraschenden Befund: Eine gewaltige Umweltkatastrophe, ausgelöst durch den Einschlag eines riesigen Meteoriten, war der Tod der kreidezeitlichen Erdbewohner. Wie in einem Detektivroman kann der Leser hautnah mitverfolgen, wie der naturwissenschaftliche Detektiv in oft mühsamer Detailarbeit ermittelt, Beweismaterial und Indizien sicherstellt, um schließlich den «außerirdischen Täter» überführen zu können.

Das Buch von Kenneth Hsü ist ein lebendiges Stück Naturwissenschaft, ein Beleg dafür, wie aufregend die Reise in die Vergangenheit unseres Planeten sein kann.

